

館山湾で観測された内部潮汐の特性

| | |
|--------|---|
| 著者 | 川辺 高央 |
| 学位授与機関 | 東京海洋大学 |
| 学位授与年度 | 2012 |
| URL | http://id.nii.ac.jp/1342/00000968/ |

修士学位論文

館山湾で観測された内部潮汐の特性

平成 24 年度
(2013 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋環境保全学専攻

川辺 高央

要旨

館山湾は東京湾外湾に位置する湾の一つで、東京湾と相模湾の両方の海域の影響を受けている。これまでに東京湾外湾や相模湾の内部潮汐の研究は進められてきたが、長期係留による館山湾の内部潮汐の研究は行われていない。館山湾の内部潮汐の特性が解明できれば、東京湾の海況変動や海水交換などに関するメカニズムの解明、周辺海域で活発な定置網漁業などの水産業に貢献できると期待される。そこで、館山湾に設置した係留系のデータを主として、夏季の館山湾の内部潮汐の特性の解明を試みた。

係留系は、2012/6/23~2012/9/10 の 79 日間、水深 181m の館山海底谷上に設置した。係留系の ADCP は 20~156m を 4m ごとに 35 層で、COMPACT-TD は 134・151m で、MicroCAT は 174m で、それぞれ 10 分間隔で観測した。また、係留系設置・回収時に CTD 観測を行った。本研究では、係留系の流速・水温のデータ、CTD データを解析に使用した。これらのデータに加え、布良と三宅島の潮位および海面気圧のデータ、海底地形データ(J-EGG500)を利用した。

係留データには顕著な潮汐周期の変動が認められ、その変動は 9 月上旬の大潮から小潮の期間に最も増幅し、南北流で振幅 30cm/s を超えていた。解析期間を同じ月齢の一週間とし、期間 A(7/5~11)、期間 B(8/3~9)、期間 C(9/1~7)とし、内部潮汐の特性を調べた。パワースペクトルを求めたところ、ほとんどの期間・測定項目において半日周期が、それに次いで 1/4 日周期が卓越していた。そこで、半日・1/4 日周期の潮流楕円の鉛直分布を描いたところ、期間 C での半日周期の潮流楕円の長軸が、期間 A・B での長軸と比べて、20~40m 深で約 2 倍に増幅していた。また、半日・1/4 日周期のバンドパスフィルターを施した流速から各期間の運動エネルギーを求めたところ、期間 C での半日周期の表層の南北成分と 1/4 日周期の 40~60m 深および底層の東西成分の運動エネルギーが増加していた。さらに、EOF 解析を行ったところ、半日周期の流速の南北成分の EOF 第 1 モードは、全ての期間において、寄与率は 72.0~81.5% と高く、力学第 1 モードの構

造と似ており、期間 C での固有値は、期間 A の 4.0 倍、期間 B の 3.4 倍であった。

期間 C に、表層の南北流の半日周期の内部潮汐が増幅された要因、40~60m 深と底層の東西流の 1/4 日周期の高調波内部波が生成・増幅された要因について考察した。Kitade *et al.*(2011)は、東京湾外湾の海底峡谷で発生する内部静振の周期が半日に近くなると、半日周期の内部潮汐が増幅し、増幅する期間では、潮位と 10m 深の流速の位相関係が 0° (同位相)で、流速が増幅すると説明している。布良の潮位と 20m 深の流速は、半日周期で、ほぼ同位相となり、彼らの結果を支持していた。よって、期間 C では、半日周期の内部潮汐が東京湾外湾の第 1 モードの内部静振と共振して増幅し、これに伴う形で館山湾の半日周期の内部潮汐が増幅したと考えられた。一方、高調波内部波は、半日周期の内部潮汐が館山湾に伝播する際に非線形効果により生成されたと考えられた。特に、1/4 日周期の高調波内部波の特性曲線の傾きと館山湾湾奥の海底の傾きが近い (Near Critical な)場所で発生したエネルギーが係留地点に達したため、40~60m 深に強い流速が観測されたと考えられた。

目次

| | | | |
|----------|-------------------------------|--------------|-----------|
| 1 | はじめに | ・ ・ ・ | 1 |
| 2 | データ | ・ ・ ・ | 4 |
| 2.1 | 観測データ | | |
| 2.2 | その他のデータ・資料 | | |
| 2.3 | データの補正 | | |
| 3 | 結果 | ・ ・ ・ | 6 |
| 3.1 | 基本場 | | |
| 3.2 | 全期間の時系列 | | |
| 3.3 | 卓越周期 | | |
| 3.4 | 潮流楕円 | | |
| 3.5 | 運動エネルギー | | |
| 3.6 | 鉛直構造 | | |
| 4 | 考察 | ・ ・ ・ | 11 |
| 4.1 | 内部波の基本特性 | | |
| 4.2 | 半日周期の内部潮汐が増幅された要因 | | |
| 4.3 | 1/4 日周期の高調波内部波が生成・増幅 された要因 | | |
| 5 | まとめ | ・ ・ ・ | 19 |
| | 謝辞 | ・ ・ ・ | 21 |
| | 参考文献 | ・ ・ ・ | 22 |
| | 図表 | ・ ・ ・ | 24 |

1 はじめに

東京湾は、三浦半島の剣崎と房総半島の洲崎を結んだ線以北の海域で、南北に長い湾である。東京湾は、東京湾内湾と東京湾外湾に分けられ、観音崎と富津岬を結んだ線以北の海域を東京湾内湾、それ以南の東京湾の海域を東京湾外湾と呼ぶ。東京湾内湾は、地形が単調で、平均水深が **15m** と浅いが、東京湾外湾は、相模湾から入り込んでいる東京海底谷に繋がっているため、急激に深くなり、複雑な地形となっている(小倉、1993)。この東京湾外湾に位置する湾の一つに、館山湾がある。館山湾は、洲崎に近く、相模湾に面している湾であり、東京海底谷から分離している館山海底谷があるため(日本海洋学会沿岸海洋研究部会、1985)、東京湾に似た地形の様相を示している(図 1)。

東京湾には、一級水系だけでも、荒川・多摩川・鶴見川・利根川水系が流れ込んでいる。東京湾に流れる河川流量は、夏季に増える傾向にある(二瓶ら、2007)(図 2)。河川による淡水の影響を受けるため、東京湾の夏季の表層の塩分は、特に低下する。実際に、2012 年 8 月の東京湾の海況は、東京湾内湾や館山湾付近の表層で塩分が **32** 以下で(千葉県水産総合研究センター、2012)(図 3)、河川水の影響をかなり受け、水温躍層だけでなく、淡水流入による塩分躍層も発生していた。

このように、東京湾などの沿岸域では、外洋と比べ、地形や躍層の変化が大きくなるといえる。このような沿岸域で発生する特徴的な海洋現象の一つに、内部潮汐が挙げられる。内部潮汐は、潮汐周期の内部波で、成層した海洋において、外洋の傾圧性の外部潮汐が大陸斜面にぶつかることで強制振動を起こして生じる傾圧性の波であり、成層が発達する夏季に強く、冬季に弱くなる傾向にある(宇野木・久保田、1996)。

東京湾外湾や相模湾の内部潮汐の研究は、係留機器や計算機が発達してきた 1980 年代以降に行われるようになってきた。Ohwaki *et al.*(1991)は、相模湾内で半日周期の内部潮汐が優勢であることを示し、Kitade and Matsuyama(1997)

は、東京湾外湾や相模湾での半日周期や一日周期の内部潮汐の発生場所や伝播の様子を明らかにした。また、藤井(2007)は、東京湾外湾に位置する富山町沖での流速・水温の長期モニタリングから、定置網の網起こしが操業できなくなった9月上旬の40cm/sの流れを、半日周期の内部潮汐によるものであると示した。これらの研究などから、東京湾外湾や相模湾の内部潮汐の研究は、明らかにされてきている。

同じく東京湾外湾に位置する館山湾の研究は、海況については明らかにされてきている。副島(1991)は、館山湾の定点CTD観測から、館山湾の海況が、周辺海域の影響を受け、館山湾の水塊が、東京湾系沿岸水・黒潮系沖合水・館山湾系沿岸水の三つに分けられるとしている。また、春から秋にかけての成層期は、表層に沿岸系低塩分水、水深100~130mの館山海底谷沿いに沖合系高塩分水があるとしている。しかし、館山湾の内部潮汐の研究は、小林(2010)が、最大一日間の係留データから館山湾に半日周期の内部潮汐が存在することを示しただけであり、内部潮汐については、未だに不明な点が多い。

館山湾に面する館山市は、県営漁港として富崎漁港・船形漁港、市営漁港として伊戸漁港・栄の浦漁港・川名漁港・見物漁港・下原漁港・洲崎漁港・波左間漁港・坂田漁港の計10漁港を有しており、館山の漁業は、沿岸漁業を中心とし、まき網や定置網、刺し網などが行われ、まき網による餌イワシでは全国的に有名である(館山市役所、2012)。阿保(2003)は、内部波と養殖漁場環境についてまとめ、内湾においてしばしば湾内水と湾外水が入れ替わることがあり、そのときに水温の急変や貧酸素水塊の湧昇を伴うことから、一時的に湾内の養殖生物に悪影響をもたらすが、長期的には海水交換が促進されることから好影響をもたらすと述べている。これらのことから、館山湾で内部潮汐の研究を行うことは、東京湾外湾の内部潮汐の動態の更なる解明だけでなく、東京湾の海況変動や鉛直混合、海水交換などのメカニズムの解明にも寄与できるといえる。また、広くは、館山湾や周辺海域で行われている定置網漁業などの水産業にも

貢献できると期待される。

そこで、本研究は、内部潮汐が強化される夏季に館山湾に係留系を設置し、主に係留データを解析し、館山湾の内部潮汐の解明を試みた。

2 データ

2.1 観測データ

2012/6/23~2012/9/10 の 79 日間、水深 181m の館山海底谷上(東経 139.80168 度、北緯 35.00350 度)で、東京海洋大学研究練習船青鷹丸により、立ち上げ式の係留系観測を行った。係留地点付近の地形を図 4、係留系の概要を図 5 に示す。係留系に用いた機器は、RDI 社製の ADCP(Workhorse 300kHz)、JFE アドバンテック社製の COMPACT-TD(ATD-HR)(以下 TD と示す)、Sea-Bird 社製の MicroCAT(SBE 37-SM)である。ADCP は 162m、TD は 134・151m、MicroCAT は 174m に設置した。全ての機器の測定間隔は 10 分とし、ADCP は 20~156m を 4m ごとに 35 層測定した。また、係留系の設置前・回収後に FSI 社製の CTD(OCTOPUS)観測を行った。

以降の解析に使用するデータとして、CTD の水温・塩分・圧力、ADCP の水温・流速、TD の水温、MicroCAT の水温のデータを使用した。ADCP の流速のデータは、東西・南北成分のデータを使用した。ADCP の流速の鉛直成分のデータはエラーの流速のデータと同程度で、MicroCAT の塩分のデータはノイズが含まれていたため、以降の解析には使用しなかった。

2.2 その他のデータ・資料

気象庁による布良と三宅島(坪田)の潮位データと布良から近い館山と三宅島のアメダスの海面気圧データ、日本海洋データセンター(JODC)による 500m メッシュ海底地形データ(J-EGG500)を使用した。潮位、アメダスともに 1 時間ごとに取得されたデータを使用した。

また、資料として、神奈川県水産技術センターから発行されている関東・東海海況速報(伊豆諸島海域)を使用した。

2.3 データの補正

係留系・CTD・潮位のデータについて補正を施した。

係留系のデータは、全期間を通して概ね良好なデータが得られた。しかし、ADCP の流速のデータについては、所々に欠測があり、データの質を示す PG4(ADCP にある 4 つのビームの全てで計算され、エラーにならなかった割合) が低い箇所があった。そのため、藤井(2007)と同様の条件を用い、PG4 の 60% 未満のデータが 6 時間未満であるときは、同じ深度の前後の時間の PG4 の 60% 以上のデータを用いて線形補正し、PG4 の 60% 未満のデータが 6 時間以上続くときは、欠測とした。この欠測が 1 層でもあったときは、欠測があった日の全ての層を欠測とした。また、ADCP で測定している流向は磁気によって測定されているために、実際の真北とは少々異なる。そのため、館山付近の海図に記載されている値を用いて磁気補正を行った。

CTD のデータについては、塩分の補正を行った。PORTASAL による塩検での値と CTD のセンサーの値の差を求め、その差が $\pm\sigma$ 以内のものを平均し、それを塩分の補正值として CTD のセンサーの値に加算した。

潮位のデータについては、そのままの値を用いると、気圧による影響を受けるため、気圧補正を行った。(1)式によって、アメダスの海面気圧を用いて、布良の潮位は館山の海面気圧を、三宅島の潮位是三宅島の海面気圧を用いて補正し、海面気圧が 1hPa 上昇すると補正後の潮位が 1cm 上昇するようにした。ここで、 t_a は補正後の潮位(cm)、 t_b は補正前の潮位(cm)、 a は海面気圧(hPa)である。

$$t_a = t_b + (a - 1013) \quad \dots (1)$$

3 結果

3.1 基本場

補正後の CTD データに、5 秒の移動平均をかけ、静水圧近似し、水温・塩分・密度(σ_t)のプロファイルを求めた。水温・塩分・密度のプロファイルを図 6.1 に示す。6 月と 9 月の CTD での最大深度が約 45m 異なっているが、これは、係留地点付近の水深が急激に変化する場所であることによるものである。水温・塩分・密度とも、躍層が 6 月では主に 10m 深付近、30~60m 深付近にみられるが、9 月では 20~50m 深付近にみられ、6 月に比べ、9 月の躍層が発達していた。

計算された密度からブラントバイサラ振動数 N を求めた。 N の式を(2)に示す。ここで、 g は重力加速度、 ρ は密度、 z は深度である。 N を求めるにあたって、値を安定させるため、再び 5 秒の移動平均をかけた。 N のプロファイルを図 6.2 に示す。 N は躍層で極大となり、6 月で $2.8 \times 10^{-2} (1/s)$ 、9 月で $4.0 \times 10^{-2} (1/s)$ であった。

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}} \quad \dots \quad (2)$$

3.2 全期間の時系列

補正後の係留系のデータの全期間の時系列を図 7.1 に示す。流速は 20・88・156m 深、水温は 174m 深の値を代表して載せた。また、館山湾の外部潮汐に値する布良の補正後の潮位と月の満ち欠けを載せた。短周期の変動を取り除くため、流速・水温のデータには、7 点移動平均を施した。全期間のデータから、9 月上旬に、流速・水温の変動が大きくなっていることが分かった。特に、表層において、移動平均後のデータで、振幅が 30cm/s 以上の強い流れが認められた。

そのため、まず、9月上旬の一週間(9/1~7)を一つの期間とした。係留期間中の月の満ち欠けを見ると、7/4・8/2・8/31に満月に、7/19・8/18に新月になっていた。内部潮汐は、外部潮汐からエネルギーを得るため、異なる期間の比較をするには、同じ月齢の日を用いて比較すればよいことになる。そのため、9月上旬の1週間(9/1~7)と同じ月齢の日であるといえる満月の翌日からの1週間を他の期間とし、解析する期間を期間A(7/5~11)、期間B(8/3~9)、期間C(9/1~7)とした。期間Aの時系列を図7.2、期間Bの時系列を図7.3、期間Cの時系列を図7.4に示す。図7.1と同様に、流速・水温のデータには7点移動平均を施した。期間Cの水温は、急上昇や急降下を繰り返し、期間A・Bと比べ、等温線の振幅が大きくなっていた。

3.3 卓越周期

期間A~Cの各期間において、どのような周期の内部波が卓越しているのかを統計的に把握するため、スペクトル解析によって、パワースペクトルを求めた。スペクトル解析の方法には、FFTW法(FFTの改良版といえるもので、2のべき乗でなくともFFTが計算できる方法)を用い、計算方法は、日野(2010)、小林(2011)にならった。パワースペクトルは、7点三角移動平均により周波数平滑を行い、自由度を12とした。また、95%の信頼区間を載せた。各期間の代表する深度の流速・水温のパワースペクトルを図8に示す。ほぼ全ての期間において、流速・水温とも半日周期のピークが卓越し、特に表層で顕著であった。また、半日周期には劣るが、1/4日周期のピークも卓越していた。

3.4 潮流槽円

パワースペクトルを求めることによって、内部波の卓越する周期は判明した

が、その周期で内部波がどのような流動をするかは分からない。そこで、調和解析によって潮流楕円を描いた。計算方法は、柳(1993)にならった。調和解析を行うにあたって、潮汐の周期を決める必要がある。対象とする周期は、スペクトルのピークが存在した半日周期、1/4 日周期とし、分潮のなかで最も大きいものは M₂ 分潮であることから M₂ 分潮(周期：12.42h)と、M₂ 分潮から発生する M₄ 分潮(周期：6.21h)とした。その結果を図 9.1 に示す。M₂ 分潮は、表層において結果が異なり、期間 C の潮流楕円が、期間 A・B の潮流楕円と比べて増幅していた。また、M₄ 分潮は、底層において結果が異なり、期間 A・C の潮流楕円が、期間 B の潮流楕円と比べて増幅していた。

M₂ 分潮において特に結果が異なっていた 20~40m 深の長軸と長軸の方向を、表 9.2 に示す。期間 C の長軸(8.0~12.6cm/s)は、期間 A の長軸(4.0~5.6cm/s)・期間 B の長軸(4.2~7.4cm/s)と比べて、全体的に約 2 倍の長さになっていた。また、長軸の方向は、南北方向の傾向にあった。

3.5 運動エネルギー

前節とは視点を変え、半日・1/4 日周期の内部波の運動エネルギーを求めた。特定の周期の運動エネルギーを求めるにあたって、そのままのデータからでは求められないため、バンドパスフィルターを施してから運動エネルギーを求めた。バンドパスフィルターは、カットオフ周期を 10~16.5h(半日周期用)、5.5~7.25h(1/4 日周期用)とし、半日周期のバンドパスフィルターは M₂ 分潮を、1/4 日周期のバンドパスフィルターは M₄ 分潮を中心として抽出するようにした(図 10)。半日周期のバンドパスフィルターを施した流速を図 11.1、1/4 日周期のバンドパスフィルターを施した流速を図 11.2 に示す。半日周期は、期間 C の南北成分の全層(特に表層)で、1/4 日周期は、期間 B の 40m 深付近と期間 C の 40~60m 深と底層の東西成分で流速が強化されていた。そこで、半日周期の南北

成分と 1/4 日周期の東西成分の代表する深度での運動エネルギー($\rho u^2/2$ 、 ρ は密度($1025(\text{kg/m}^3)$)で一定とした)、 u は流速(m/s) の各期間での合計を求めた。その結果を表 12 に示す。期間 C での半日周期の南北成分の運動エネルギーは、期間 A・B と比べて全体的に増加し、特に、60m 深では、期間 A・B の 10 倍以上で、156m 深では、期間 A の 3.7 倍、期間 B の 5.5 倍であった。また、期間 C での 1/4 日周期の東西成分の運動エネルギーは、40~60m 深と 140~156m 深で増加し、特に、60m 深では、期間 A の 6.1 倍、期間 B の 2.5 倍で、156m 深では、期間 A の 2.0 倍、期間 B の 12.5 倍であった。

3.6 鉛直構造

この節では、半日・1/4 日周期の内部波がどのような鉛直構造を有するのかを調べた。鉛直構造を求めるには、力学モード解析と EOF 解析(主成分解析)の二つの方法がある。力学モード解析は、一般的に、海底勾配が大きい(海底が複雑な)ところで用いると、カップリングが生じ、力学モードの分離が上手くできなくなる。そのため、EOF 解析によって、半日・1/4 日周期の鉛直構造を明らかにした。EOF 解析は、統計処理による解析であるため、流速の生データを EOF 解析しても、半日・1/4 日周期の鉛直構造は求められない。そこで、前節と同様に、バンドパスフィルターを施してから EOF 解析することにより、半日・1/4 日周期の内部波の鉛直構造を求めた。計算方法は、松山・谷本(2008)にならった。鉛直構造の結果といえる深度ごとの固有ベクトルを、図 13.1 に示す。EOF 第 1 モードは、解析期間のうち最も現象を表すものを示しているため、必ずしも力学第 1 モードを示すものではない。そこで、半日周期の EOF モードが、どの力学モードに近いかをみる。東西成分の EOF 第 1 モードは、全ての期間でゼロクロスしており、力学第 2 モードと同様の構造を示した。しかし、南北成分の EOF 第 1 モードは、全ての期間において、20~60m 深では、ゼロクロスせず、60m

深からは、ほぼ 0 となり、力学第 1 モードと同様の構造を示した。このように、ゼロクロスから力学モードを仮定すると、東西成分の EOF 第 2 モードは、期間 A で力学第 1 モード、期間 B・C で力学第 3 モード、南北成分の EOF 第 2 モードは、全ての期間で力学第 2 モードと仮定できた。東西成分の EOF 第 3 モードは、期間 A で力学第 3 モード、期間 B・C で力学第 4 モード、南北成分の EOF 第 3 モードは、全ての期間で力学第 3 モードと似ていた。同様にして、1/4 日周期の EOF モードが、どの力学モードに近いかをみる。東西成分の EOF 第 1 モードは、期間 A・B で力学第 2 モード、期間 C で力学第 3 モード、南北成分の EOF 第 1 モードは、期間 A で力学第 3 モード、期間 B・C で力学第 1 モードと仮定できた。東西成分の EOF 第 2 モードは、期間 A で力学第 4 モード、期間 B で力学第 3 モード、期間 C で力学第 2 モード、南北成分の EOF 第 2 モードは、期間 A・B で力学第 4 モード、期間 C で力学第 3 モードと似ていた。東西成分の EOF 第 3 モードは、期間 A で力学第 3 モード、期間 B・C で力学第 4 モード、南北成分の EOF 第 3 モードは、期間 A で力学第 5 モード、期間 B で力学第 3 モード、期間 C で力学第 4 モードのようであった。これらの仮定した力学モードから、1/4 日周期の EOF モードは、半日周期の EOF モードと比べて、仮定した力学モードが高次になる傾向にあることが分かった。

また、半日・1/4 日周期の EOF 第 1~3 モードの固有値と寄与率を、表 13.2 に示す。半日周期の南北成分の流速の期間 C での固有値は、期間 A の 4.0 倍、期間 B の 3.4 倍であった。半日周期の EOF 第 1 モードの寄与率は、東西成分では 47.2~54.3%、南北成分では 72.0~81.5%で、半日周期の南北成分の現象は、ほぼ EOF 第 1 モードで示されていた。1/4 日周期の寄与率は、半日周期の寄与率と比べて、東西・南北成分ともに EOF 第 1 モードは減少し、EOF 第 2~3 モードは増加する傾向にあった。

4 考察

結果から、期間 C に、表層で半日周期の内部潮汐が増幅され、40~60m 深や底層で外部潮汐にはみられない 1/4 日周期の高調波内部波が生成・増幅されていたことが分かった。これらが生成・増幅された要因について考察する。

4.1 内部波の基本特性

半日周期の内部潮汐と 1/4 日周期の高調波内部波の特性を力学的に考えてみる。ブシネスク・静水圧近似し、コリオリ力を考慮した運動方程式を(3)~(5)、連続の式を(6)、密度変化の式を(7)に示す(例えば、宇野木(1993))。ここで、 u 、 v 、 w は x 、 y 、 z 方向の流速、 t は時間、 $f (= 2\Omega \sin \varphi)$ 、 Ω は地球自転の角速度で $7.2921 \times 10^{-5} (1/s)$ 、 φ は緯度)はコリオリパラメータ、 ρ は場の平均の密度、 ρ' は ρ からの変動成分、 p' は場の平均の圧力からの変動成分である。

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial y} \quad \dots (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\rho'}{\rho} g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} \quad \dots (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots (6)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad \dots (7)$$

(3)~(7)とバイサラ振動数の式(2)から、ブシネスク近似を適用し、 w だけの式を作ると、式(8)が得られる。

$$\left(\frac{\partial}{\partial t^2} + N^2\right)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial}{\partial t^2} + f^2\right)\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0 \quad \dots \quad (8)$$

$w = e^{i(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)}$ と仮定し(k_x 、 k_y 、 k_z はそれぞれ x 、 y 、 z 方向の波数、 ω は周波数)、実数部を採ると、式(9)のように波の分散関係式が求まる。

$$\omega^2 = \frac{N^2(k_x^2 + k_y^2) + f^2 k_z^2}{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \quad \dots \quad (9)$$

ここで、 N 、 ω 、 f の周期関係をみる。 ω の周期($1/\omega$)は、半日周期として M₂ 分潮(12.42h)、1/4 日周期として M₄ 分潮(6.21h)とした。 N の周期($2\pi/N$)は、CTD データの結果から 0.04~1.53h、 f の周期($2\pi/f$)は、20.86hであった。よって、半日・1/4 日周期ともに、 $2\pi/f > 1/\omega > 2\pi/N$ の関係になり、半日周期の内部潮汐と 1/4 日周期の高調波内部波は内部慣性重力波であるといえた。

次に、 k を x 、 y 、 z 方向の合成の波数 $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ とし、 k_x 、 k_y 、 k_z を極座標で表すと、式(9)は式(10)のように整理される。ここで、 θ は、水平面とのなす角度である。

$$\omega^2 = N^2 \cos^2 \theta + f^2 \sin^2 \theta \quad \dots \quad (10)$$

式(8)を変化させ、 $\partial^2 w / \partial z^2 = R_k^2 (\partial^2 w / \partial x^2 + \partial^2 w / \partial y^2)$ とし、 $w \propto e^{i\omega t}$ であるとして、実数部を採ると、 $R_k^2 = (N^2 - \omega^2) / (\omega^2 - f^2)$ となる。この式に式(10)を代入すると、内部波の位相 R_k の伝播方向は、式(11)のように求められる。また、内部波の位相とエネルギーは直交することから、内部波のエネルギー R_g の伝播方向は、式(12)のように求められ、連続成層下の内部波は、特定の方向に伝播することが分かる。

$$R_k = \pm \tan \theta \quad \cdot \cdot \cdot \quad (11)$$

$$R_g = \mp \frac{1}{\tan \theta} \quad \cdot \cdot \cdot \quad (12)$$

内部波が海底で反射するとき、内部波が入射する方向と水平面とのなす角 θ と、海底と水平面とのなす角 θ' の関係によって、反射の仕方が異なってくる。内部波の反射の模式図を図 14 に示す。 $\theta > \theta'$ であるとき、内部波は前方反射 (Subcritical) し、 $\theta < \theta'$ であるとき、内部波は後方反射 (Supercritical) する。 $\theta \approx \theta'$ であるときは、内部波は Near Critical となり、運動エネルギーの密度が大きくなり、内部波が増幅する。

4.2 半日周期の内部潮汐が増幅された要因

期間 C の表層の南北成分の、半日周期の内部潮汐の増幅の様子は、潮流楕円などの結果において、最も特徴的であったといえる。そこで、半日周期の内部潮汐が増幅された要因について考えてみる。内部潮汐は、成層の状態によって強化されることが多いことから、躍層の位置や成層の強さの変化だけが、内部

潮汐が強化された要因のようにみえる。しかし、東京湾外湾での半日周期の内部潮汐の増幅は、躍層の位置の変化だけではうまく説明できず、Kitade et al.(2011)により、内部潮汐が東京湾外湾の海底峡谷に反射することで発生する内部静振の周期が変化し、内部静振と半日周期の内部潮汐が共振することによるものであることが明らかにされている。

そこで、まず、東京湾外湾の内部静振の周期を概算する。内部静振は、海洋が2層に成層しているとする、その周期 T_n は、(13)式で求められる。

$$T_n = \frac{2L_e}{n} \sqrt{\frac{h_1 + h_2}{g'h_1h_2}} \quad \dots \quad (13)$$

ここで、 L_e は東京湾外湾の南北方向の長さ(m)、 n は内部静振のモード数(1、2、 \dots)、 h_1 は上層の厚さ(m)、 h_2 は下層の厚さ(m)、 $g' (= \Delta\rho/\rho \cdot g)$ は reduced gravity(m/s²)である。東京湾外湾の地形に関しては、Kitade et al.(2011)に
 ならい、 $L_e = 21000$ 、 $h_1 + h_2 = 500$ とした。CTDデータの密度のプロファイルから、6月を $h_1 = 40$ 、 $h_2 = 460$ 、 $\Delta\rho \approx 2$ 、9月を $h_1 = 30$ 、 $h_2 = 470$ 、 $\Delta\rho \approx 3$ とし、6月と9月の T_1 を求めた。すると、6月は 4.90×10^4 (s) ≈ 13.6 (h)、9月は 4.57×10^4 (s) ≈ 12.7 (h)となり、9月の第1モードの内部静振の周期が、半日周期の内部潮汐の周期に近づき、共振しやすい周期となったことが分かった。

また、Kitade et al.(2011)は、東京湾を簡単な地形にし、外洋から外部潮汐を与え、2通りの水温のプロファイルを用いた数値実験を行うことで東京湾外湾の流速と潮位の位相を調べ、順圧流速と潮位の位相は期間によらず 90° となるが、10m深の地点Rの流速と潮位の位相は 90° ではなくなり、 0° (同位相)になるときは地点Rの流速が増幅することを説明している(図15.1~2)。流速と潮位の位相が 90° ではなくなったことは、傾圧的な潮流になったことを意味し、内部潮汐

の存在を裏付けているといえる。

そこで、今度は、布良の潮位と、20m 深の流速の半日周期(12.00h)のコヒーレンスとフェイズを求める。潮位を時間で線形補正して 10 分ごとのデータとし、パワースペクトルのときと同様に、自由度を 12 とした。その結果を表 16 に示す。期間 A では、流速の両方の成分でコヒーレンスが 95%の信頼限界よりも低かった。期間 B・C では、流速の両方の成分でコヒーレンスが 95%の信頼限界よりも高くなり、期間 B のフェイズは、東西成分で 63°、南北成分で-1°と、東西成分で 2 時間ほど流速の位相が早くなっていたが、期間 C のフェイズは、東西成分で-8°、南北成分で-36°と、流速の両方の成分の位相の差が小さくなり、0°(同位相)に近づいていた。

次に、24h タイドキラーフィルター(図 17(a))と同等の特性をもつ 32h ローパスフィルター(図 17(b))を、布良と三宅島の潮位に施したところ、三宅島の潮位は、期間 A・B とマイナスだったが、期間 C で大きく上昇し、プラスに転じていた。また、布良の潮位も、期間 C で少々上昇していた(図 18)。三宅島の潮位の上昇は、黒潮が接岸し、房総半島南岸の流速が強化されることと関連している(Iwata and Matsuyama,1989)。神奈川県水産技術センターによると、期間 C の黒潮の流軸の中心は三宅島付近にあった(図 19.1~3)。この三宅島や布良の潮位の上昇は、黒潮系の暖水が三宅島や布良に波及していたことを示しているといえる。また、Kitade and Matsuyama(1997)は、半日周期の内部潮汐が、房総半島南岸や伊豆海嶺で発生し、房総半島南岸で発生したものは東京湾外湾に、伊豆海嶺で発生したものは相模湾に伝播することを示している(図 20)。今回の期間 C の半日周期の内部潮汐は、水温の急上昇・急降下を伴っていた。館山湾に近い相模湾は、時々急潮が発生することがあるが、急潮は、よく水温の急上昇・急降下を伴う (例えば、松山ら(1992))。そのため、今回の期間 C の内部潮汐は、黒潮が接岸することで発生した急潮由来のものである可能性が十分に考えられる。

これらのことから、期間 C に、黒潮が接岸して急潮が発生し、半日周期の内部潮汐が生成される海域である房総半島南岸の流れが強化され、そこで発生した半日周期の内部潮汐が、東京湾外湾に伝播・反射し、東京湾外湾の内部静振と共振を起こしたため、東京湾外湾の表層の南北方向の流速の強化に伴って、館山湾の表層の南北方向の流速が強化されたと考えられた。

4.3 1/4 日周期の高調波内部波が生成・増幅された要因

1/4 日周期の高調波内部波が、期間 C の 40~60m 深や底層の東西成分で強化され、1/4 日周期の EOF 解析から仮定された力学モードが、半日周期のものと比べて高次になっていたことは、興味深いことである。そこで、1/4 日周期の高調波内部波が生成・増幅された要因について考えてみる。

東京湾の内部潮汐は非線形効果が強い現象であることが、日向ら(2000)により報告されている。そこで、非線形効果がどのような現象を引き起こすのかを理論的に考える。一次元の波を仮定し、波の流速を $u = e^{i(kx - \omega t)}$ とする。非線形項は $u \cdot \partial u / \partial x$ であるから、 $u \cdot \partial u / \partial x = i k e^{2i(kx - \omega t)}$ となる。この実数部を採ると、 $-k \sin\{2(kx - \omega t)\}$ となり、 2ω の周波数の波ができる。よって、非線形効果により、半日周期の内部潮汐から、2 倍潮である 1/4 日周期の高調波内部波が生成されることが分かる。

ここで、時間で線形補正して 10 分ごとのデータとした布良の潮位と 156m 深の東西成分の流速のパワースペクトルの M₄ 分潮と M₂ 分潮の比をみる(表 21)。前節と同様に、自由度を 12 とした。すると、潮位の M₄ 分潮と M₂ 分潮の比は 10^{-3} のオーダーであるが、流速のその比は 10^0 のオーダーであり、流速のオーダーが 10^3 のオーダーほど高いことが分かった。また、中野(1940)による油壺の調和常数から求めた 1/4 日周期と半日周期の分潮の比も、 7.7×10^{-3} と 10^{-2} のオーダーであり、流速のオーダーが 10^2 のオーダーほど高いことが分かった。これらの

ことは、1/4 日周期の高調波内部波の生成が、半日周期の外部潮汐によるものではなく、半日周期の内部潮汐の非線形効果によるものであることを示している。

このような非線形効果による 1/4 日周期の高調波内部波が、どのように伝播・反射し、増幅していったのかを考える。底層での 1/4 日周期の高調波内部波の伝播の様子を、パワースペクトルのときと同様に自由度を 12 としたコヒーレンス・フェイズを用いて調べると、コヒーレンスは高く、フェイズは浅い方が遅れ、底層での 1/4 日周期の高調波内部波の位相は浅い方に向かって伝播していた(表 22)。内部波の位相とエネルギーは直交することから、底層での 1/4 日周期の高調波内部波のエネルギーは深い方に向かって伝播していたといえる。そこで、式(12)を用いて、期間 C(≈係留系回収時)の 1/4 日周期の高調波内部波のエネルギーの伝播方向の傾き R_g と、係留地点から東の、内部波が入射する場所の海底地形の傾き R_i の鉛直プロファイルと比較すると、水深 25m 以深で $R_g < R_i$ となった(図 23)。これは、期間 C の 1/4 日周期の高調波内部波が、館山湾湾奥の斜面上で後方反射したことを意味している。この期間 C の後方反射した 1/4 日周期の高調波内部波の特性曲線(エネルギーの伝播の様子)を、図 24 に示す。期間 C の後方反射した 1/4 日周期の高調波内部波の特性曲線は西に向かい、係留地点(TM)には、水深 50m 付近のところで特に密になって達していた。これは、係留地点から東におよそ 1.5~2km 先のところにある、館山湾湾奥の水深 30m 付近のところの海底地形の傾きが、特性曲線の傾きと比べて、わずかに大きかったこと、いわゆる **Near Critical** であったことを示している。また、特性曲線が密になったことは、エネルギーの増加を示し、バンドパスフィルターなどでの 1/4 日周期の東西成分の 40~60m 深の増幅の様子を支持している。底層の増幅の様子は、係留地点付近の地形が急峻で、CTD による底層のプロファイルが得られていないことから、示すことができなかった。しかし、底層の特性曲線と海底の傾きから判断すると、底層の特性曲線と海底の傾きも近いものになると推測できる。また、海況は日々変化することから、CTD 観測を行った日(9/10)には、

100m 深付近にあった特性曲線の収束が、期間 C(9/1~7)には、より深い 150m 深付近に存在していたために底層で増幅したと示唆できる。

これらのことから、 $1/4$ 日周期の高調波内部波の東西成分が生成された要因は、半日周期の内部潮汐が館山湾に伝播する際に、非線形効果によって半日周期の 2 倍潮の波が生じたためと考えられた。したがって、観測結果で 40~60m 深の $1/4$ 日周期の高調波内部波の東西成分が増幅された要因は、 $1/4$ 日周期の高調波内部波が、館山湾湾奥の水深 30m 付近のところで後方反射し、反射した $1/4$ 日周期の高調波内部波のエネルギーの傾きと海底の傾きが **Near Critical** となり、そのエネルギーが係留地点の水深 50m 付近のところを通過したためと考えられた。

5 まとめ

夏季の館山湾の内部潮汐の特性を把握するため、主に係留系のデータを解析したところ、主に以下のこと①~④が分かった。

- ① 流速と水温のパワースペクトルから、半日周期、それに次いで 1/4 日周期にピークがみられた。
- ② M₂ 分潮の潮流楕円を描くと、表層で南北方向が長軸の中心となり、期間 C の表層の長軸は 8.0~12.6cm/s で、期間 A・B の約 2 倍の長さになっていた。
- ③ 運動エネルギーは、期間 C の半日周期の表層の南北成分、期間 B の 1/4 日周期の 40m 深の東西成分、期間 C の 1/4 日周期の 40~60m 深と 140m 以深の東西成分で増加していた。
- ④ EOF 解析で鉛直構造を求めたところ、半日周期の南北成分の期間 C での固有値が、期間 A の 4.0 倍、期間 B の 3.4 倍になった。半日周期の南北成分の EOF 第 1 モードの寄与率は 72.0~81.5% と高く、力学第 1 モードの構造と似ていたが、半日周期の東西成分の EOF 第 1 モードの寄与率は 47.2~54.3% で、力学第 2 モードの構造と似ていた。

これらの結果から、期間 C の、半日周期の内部潮汐の表層の南北成分の増幅や 1/4 日周期の高調波内部波の 40~60m 深の東西成分の生成・増幅について、以下のこと①~②が考察された。

① 半日周期の内部潮汐の増幅については、房総半島南岸で発生した内部潮汐が東京湾外湾に伝播・反射して内部静振と共振し、その共振が館山湾にも伴って発生したためと考えられた。

② 1/4 日周期の高調波内部波の生成については、非線形効果が半日周期の内部潮汐に生じたため、1/4 日周期の高調波内部波の増幅については、館山湾湾奥で後方反射した 1/4 日周期の高調波内部波の特性曲線の傾きと海底の傾きが近く (Near Critical に) なったためと考えられた。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、博士前期課程の二年間ご指導をいただきました北出 裕二郎 准教授に対し、心より感謝申し上げます。有意義な議論をいただきました 吉田 次郎 教授、根本 雅生 准教授に対し、感謝申し上げます。また、データ解析についてのアドバイスをくださいました 笠島 克恵 博士、係留系作成の際にアドバイスをくださいました 王 琦 博士に対し、お礼申し上げます。係留系設置・回収の際には、喜多澤 彰 船長をはじめとする青鷹丸の乗組員の皆様のお力添えがあったために、無事設置・回収することができました。感謝しております。最後になりましたが、海洋物理学研究室と資源・海洋情報解析学研究室の皆様、ありがとうございました。

参考文献

- 阿保 勝之 (2003) : 内湾での内部波と養殖漁場環境. 海洋と生物, **148**, 323-329.
- 千葉県水産総合研究センター (2012) : 東京湾海況情報.
<http://www.pref.chiba.lg.jp/lab-suisan/suisan/kaikyoujouhou/documents/201205joho.pdf> (アクセス日 2013/1/29).
- 藤井 亮平 (2007) : 東京湾湾口東部の内部潮汐に関する研究. 東京海洋大学修士学位論文, 34pp.
- 花輪 公雄, 三寺 史夫 (1985) : 海洋資料における日平均値の作成について -日平均潮位を扱う際の問題点-. 沿岸海洋研究ノート, **23**, 79-87.
- 日向 博文, 八木 宏, 灘岡 和夫, 斉藤 輝彦, 田淵 博嗣 (2000) : 夏季東京湾における内部潮汐波の基本特性について. 海岸工学論文集, **47**, 426-430.
- 日野 幹雄 (2010) : スペクトル解析新装版. 朝倉書店, 183-236.
- Iwata,S. and M.Matsuyama (1989) : Surface Circulation in Sagami Bay : the response to variations of the Kuroshio axis. *J.Oceanogr.Soc.Japan*, **45**, 310-320.
- Kitade,Y. and M.Matsuyama (1997) : Characteristics of Internal Tides in the Upper Layer of Sagami Bay. *J.Oceanogr.*, **53**, 143-159.
- Kitade,Y. , Y.Igeta , R.Fujii and M.Ishii (2011) : Amplification of semidiurnal internal tide observed in the outer part of Tokyo Bay. *J.Oceanogr.*, **67**, 613-625.
- 小林 一行 (2011) : 最新 MATLAB ハンドブック第四版. 秀和システム, 125-198.
- 小林 三四郎 (2010) : 館山湾の内部潮汐に関する研究. 東京海洋大学卒業論文, 22pp.
- 松山 洋, 谷本 陽一 (2008) : Unix/Windows/Macintosh を使った実践！気候データ解析第二版. 古今書院, 59-71.

- 松山 優治, 岩田 静夫, 前田 明夫, 鈴木 亨 (1992) : 相模湾の急潮. 沿岸海洋研究ノート, **30**, 4-15.
- 中野 猿人 (1940) : 潮汐学. 古今書院, 457.
- 二瓶 泰雄, 高村 智之, 渡邊 敬之 (2007) : 東京湾主要流入河川における流量モニタリングの現状と課題. 海岸工学論文集, **54**, 1226-1230.
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会 (1985) : 日本全国沿岸海洋誌. 東海大学出版会, 389-427.
- 小倉 紀雄 (1993) : 東京湾-100年の環境変遷-. 恒星社厚生閣, 11-59.
- Ohwaki,A. , M.Matsuyama and H.Nagashima (1991) : Evidence for Predominance of Internal Tidal Currents in Sagami and Suruga Bays. *J.Oceanogr.Soc.Japan*, **47**, 194-206.
- 副島 敬道 (1991) : 館山湾の海況特性に関する研究. 東京水産大学修士学位論文, 100pp.
- 館山市役所 (2012) : 館山の水産業概要.
<http://www.city.tateyama.chiba.jp/nousuisan/page000159.html> (アクセス日 2013/1/29).
- 宇野木 早苗 (1993) : 沿岸の海洋物理学. 東海大学出版会, 329-397.
- 宇野木 早苗, 久保田 雅久 (1996) : 海洋の波と流れの科学. 東海大学出版会, 166-177.
- 柳 哲雄 (1993) : 海洋観測データの処理法. 恒星社厚生閣, 46-56.

図表

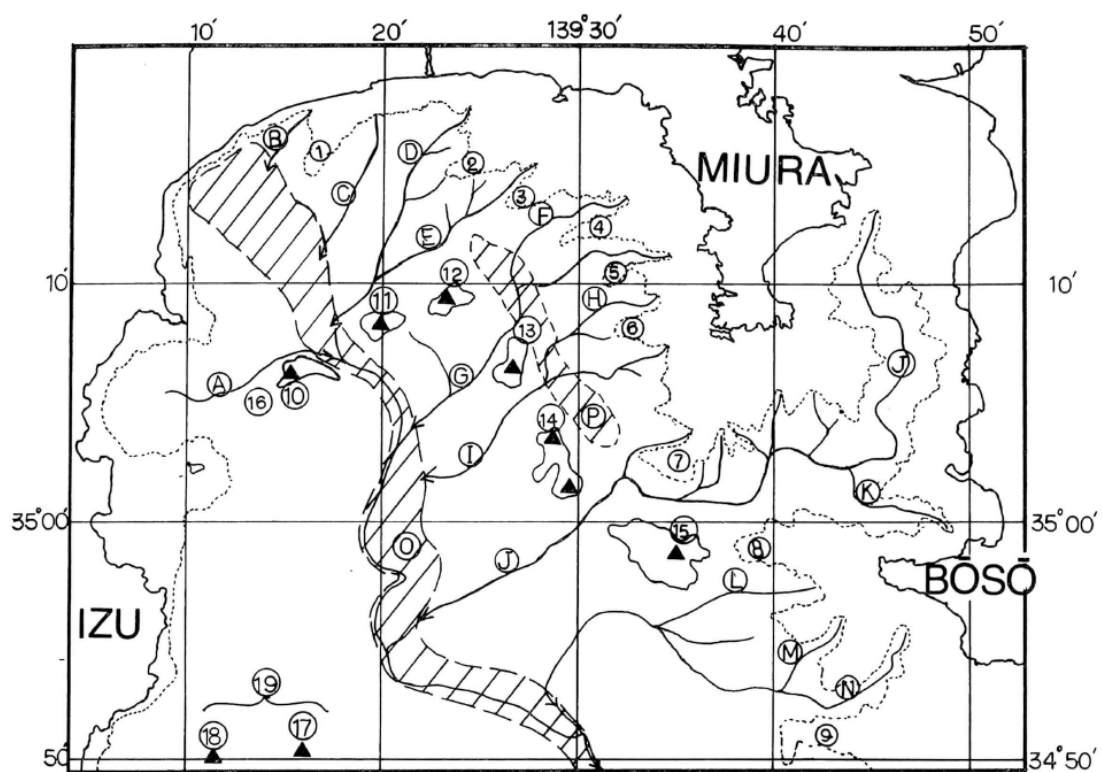


図 1 相模湾と東京湾外湾の海底地形。㊦が東京海底谷で、㊫が館山海底谷である。(日本海洋学会沿岸海洋研究部会(1985)より引用)

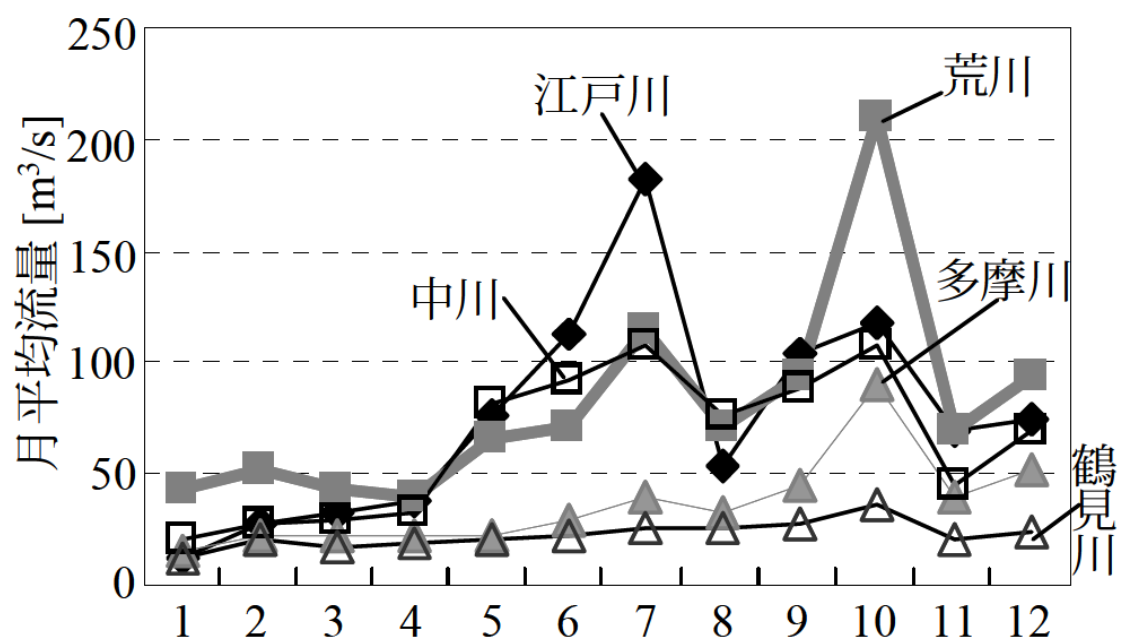


図 2 2006 年に東京湾に流れ込んだ主要河川の流量。(二瓶ら(2007)より引用)

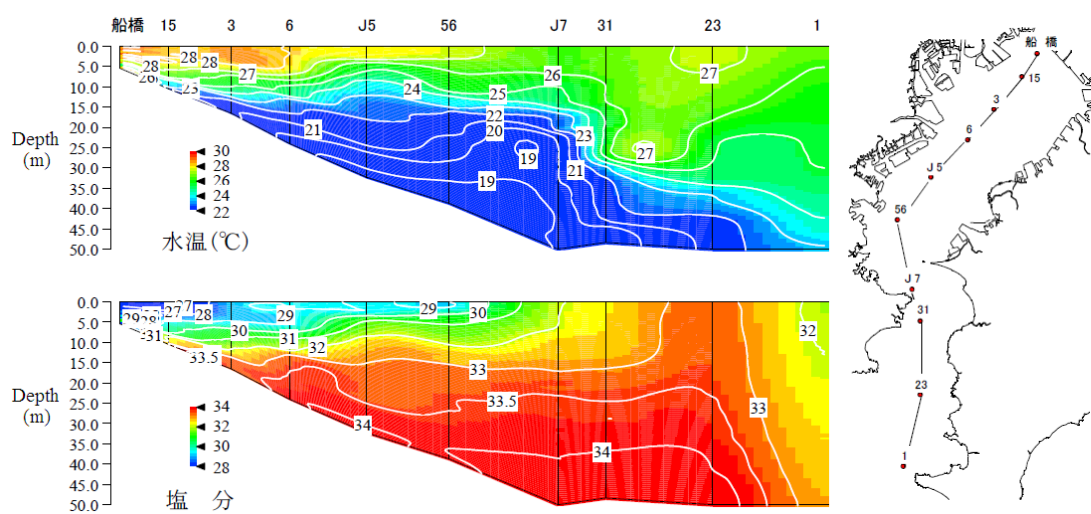


図3 2012年8月の東京湾の水温・塩分の鉛直断面と観測点の位置。(千葉県水産総合研究センター(2012)より引用、一部改変)

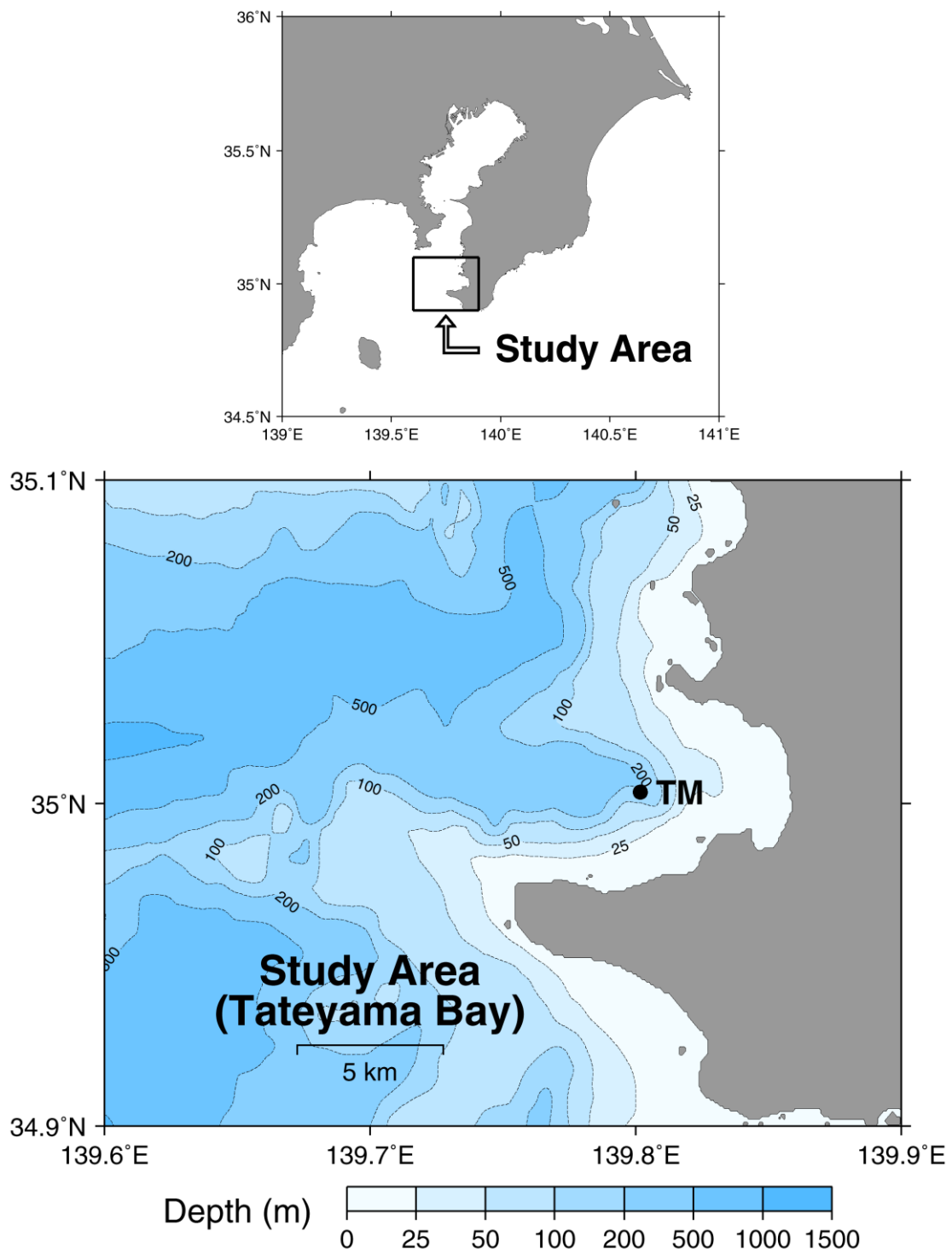


図 4 館山湾の等水深図と係留地点。黒い点は係留地点(TM)である。

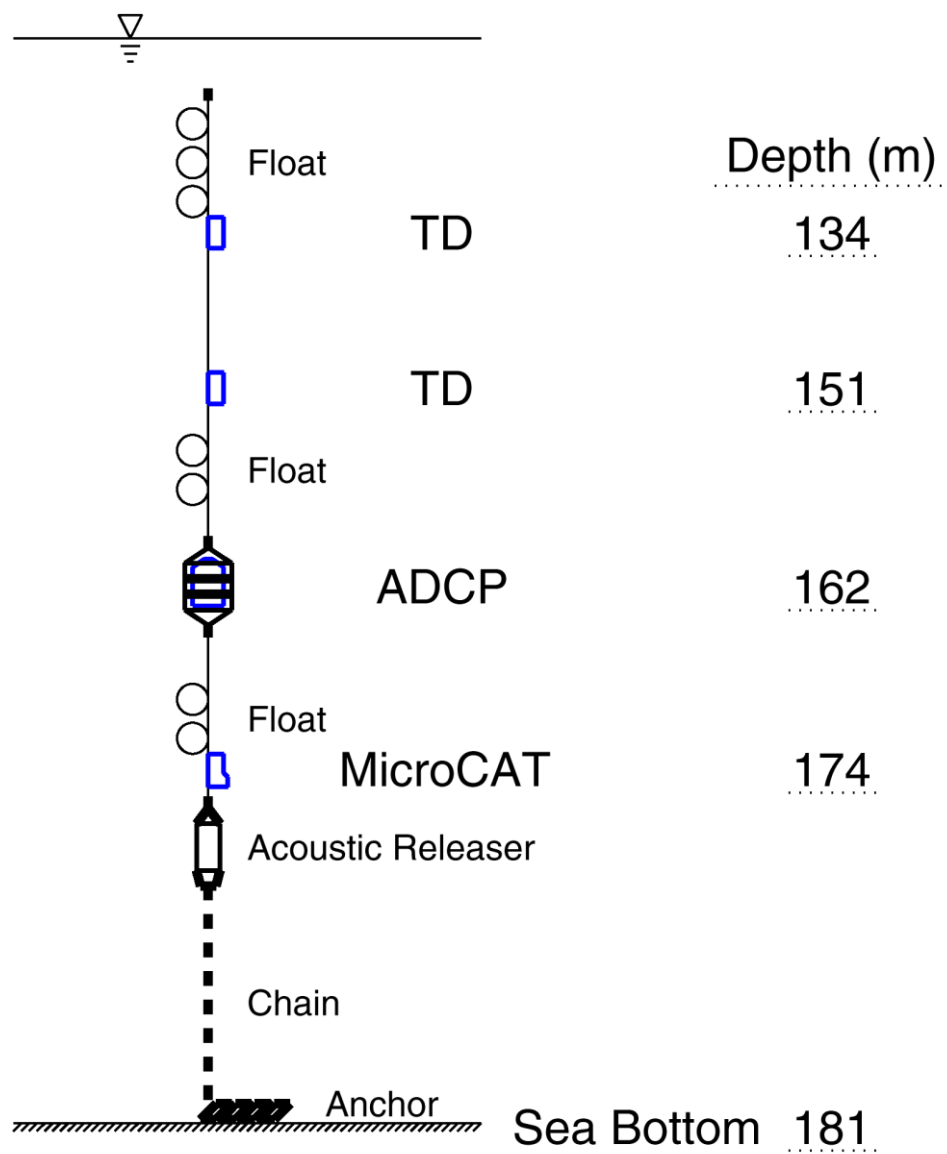
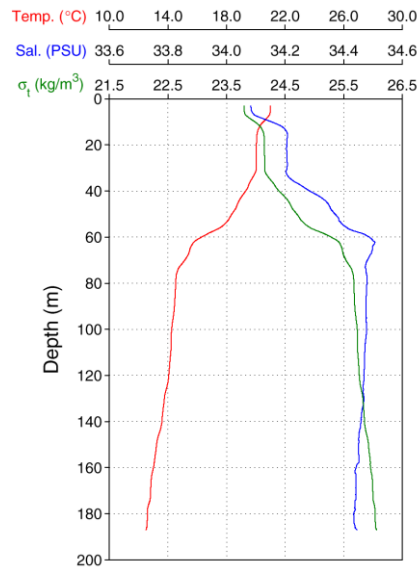


図 5 係留系の模式図と機器の設置深度・海底深度。

(a)



(b)

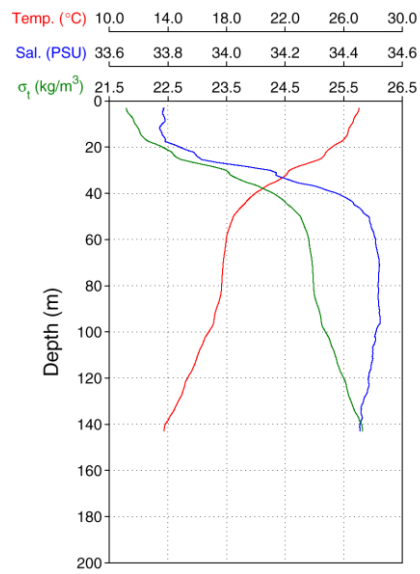
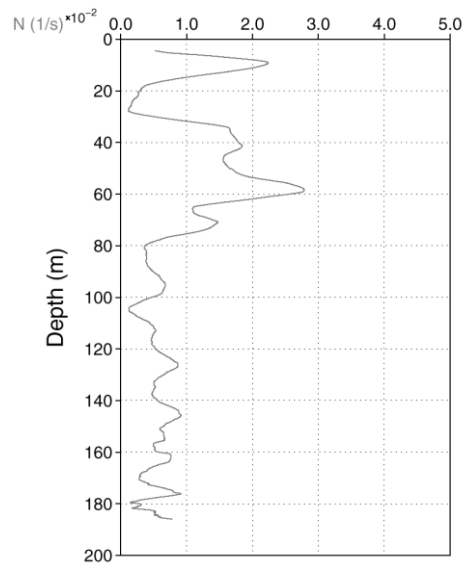


図 6.1 水温・塩分・密度の鉛直プロファイル。

(a) 係留系設置時の鉛直プロファイル。

(b) 係留系回収時の鉛直プロファイル。

(a)



(b)

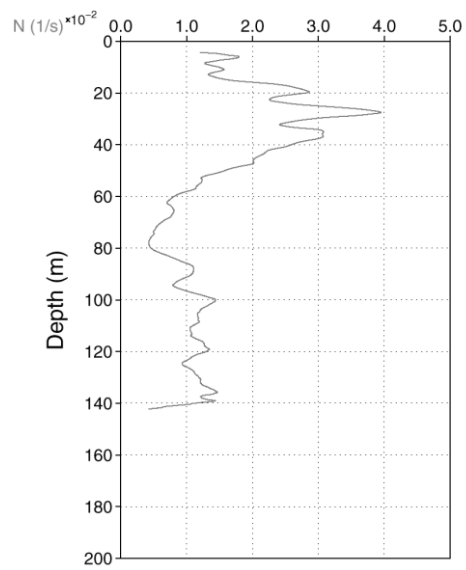


図 6.2 ブラントバイサラ振動数の鉛直プロファイル。

(a) 係留系設置時の鉛直プロファイル。

(b) 係留系回収時の鉛直プロファイル。

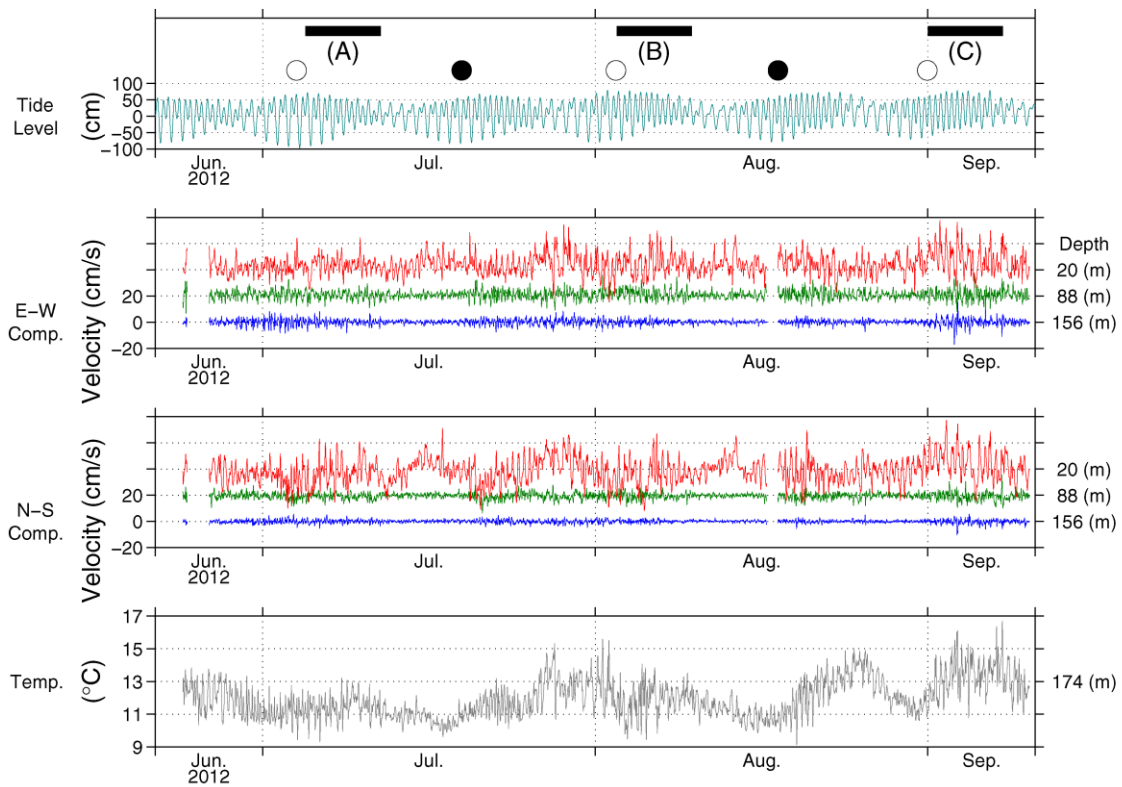


図 7.1 布良の潮位と、流速(東西・南北成分)・水温の時系列。この図での期間は 2012/6/21~9/10 とし、係留系の全期間のデータを載せるようにした。流速は 20・88・156m 深、水温は 174m 深を代表して載せた。流速は 156m 深を基準とし、88m 深を 20(cm/s)、20m 深を 40(cm/s)ずらして描いた。短周期の変動を取り除くため、流速・水温には 7 点移動平均を施した。○は満月、●は新月、(A)~(C)は解析期間である。

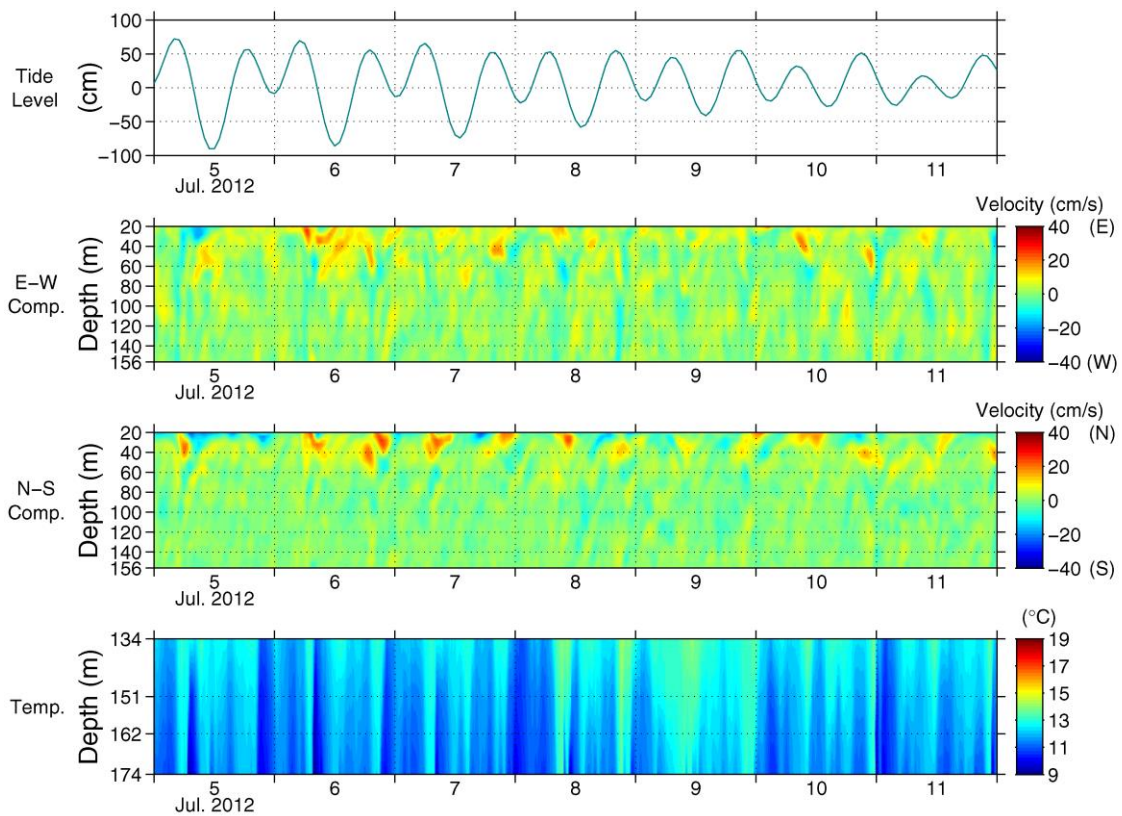


図 7.2 期間 A(2012/7/5~11)における布良の潮位と、流速・水温の時系列。短周期の変動を取り除くため、流速・水温には 7 点移動平均を施した。

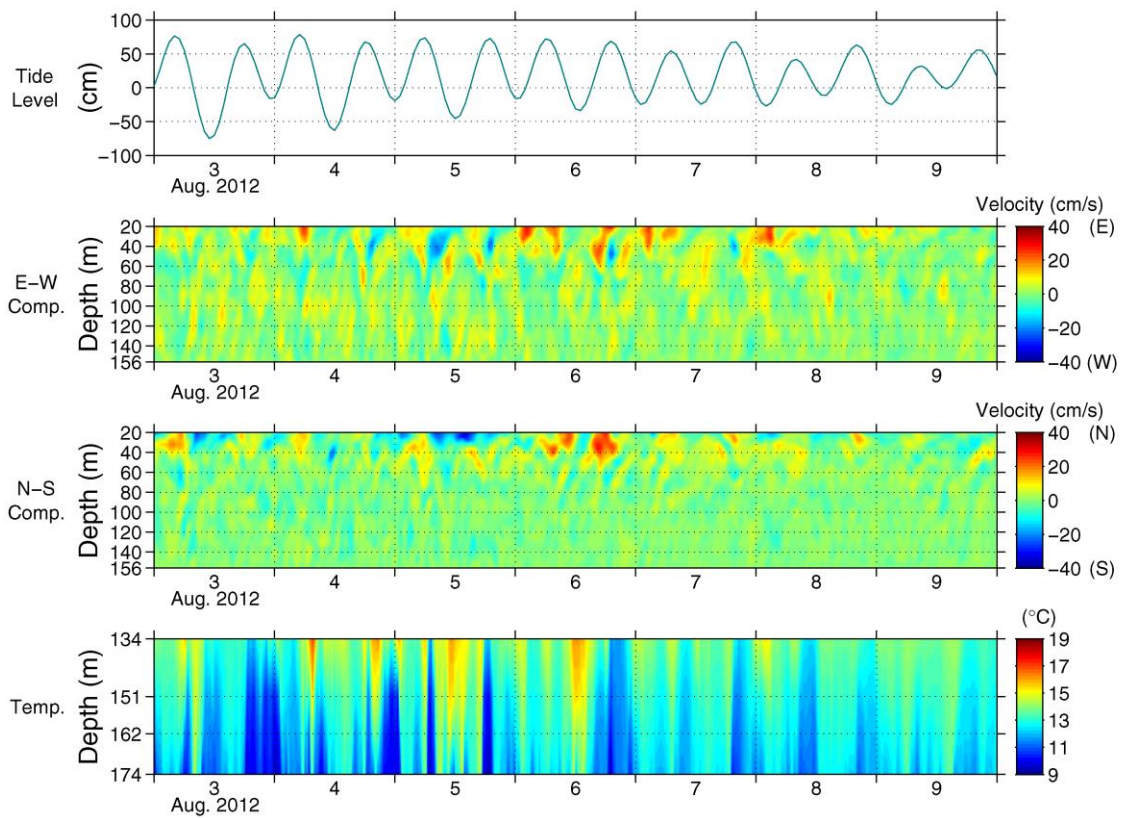


図 7.3 期間 B(2012/8/3~9)における布良の潮位と、流速・水温の時系列。短周期の変動を取り除くため、流速・水温には 7 点移動平均を施した。

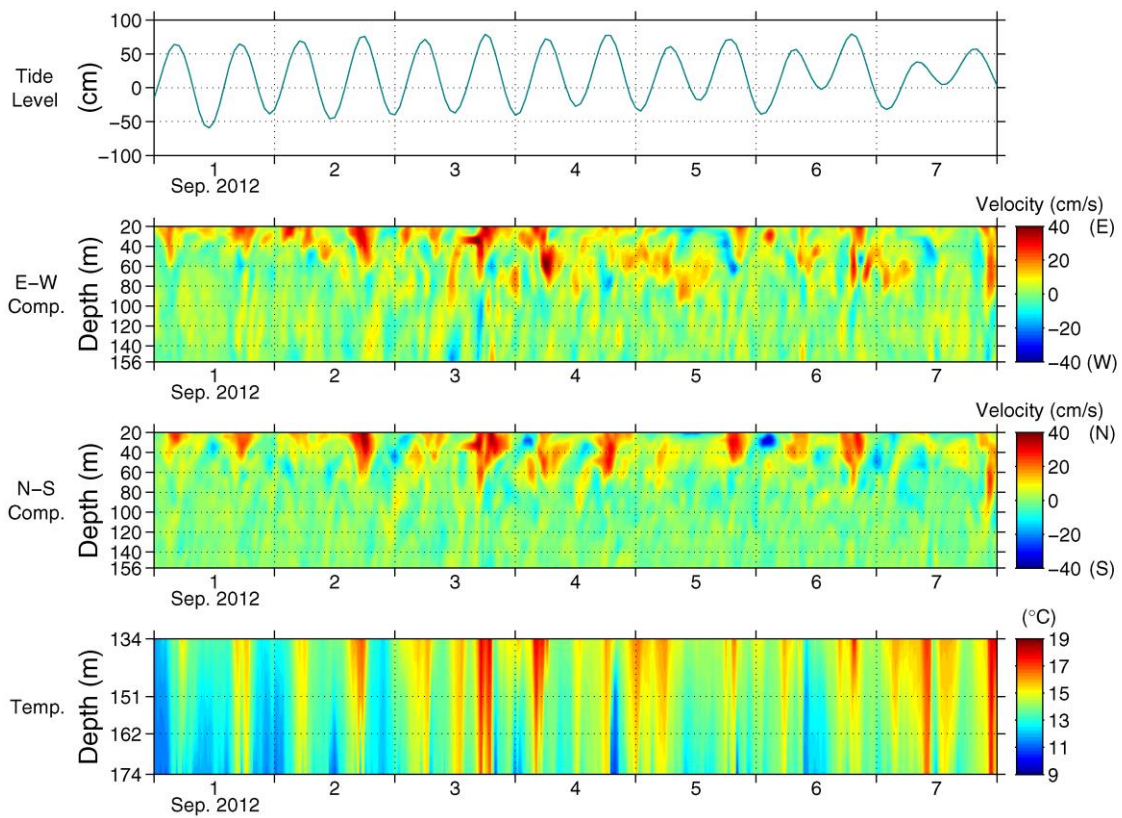


図 7.4 期間 C(2012/9/1~7)における布良の潮位と、流速・水温の時系列。短周期の変動を取り除くため、流速・水温には 7 点移動平均を施した。

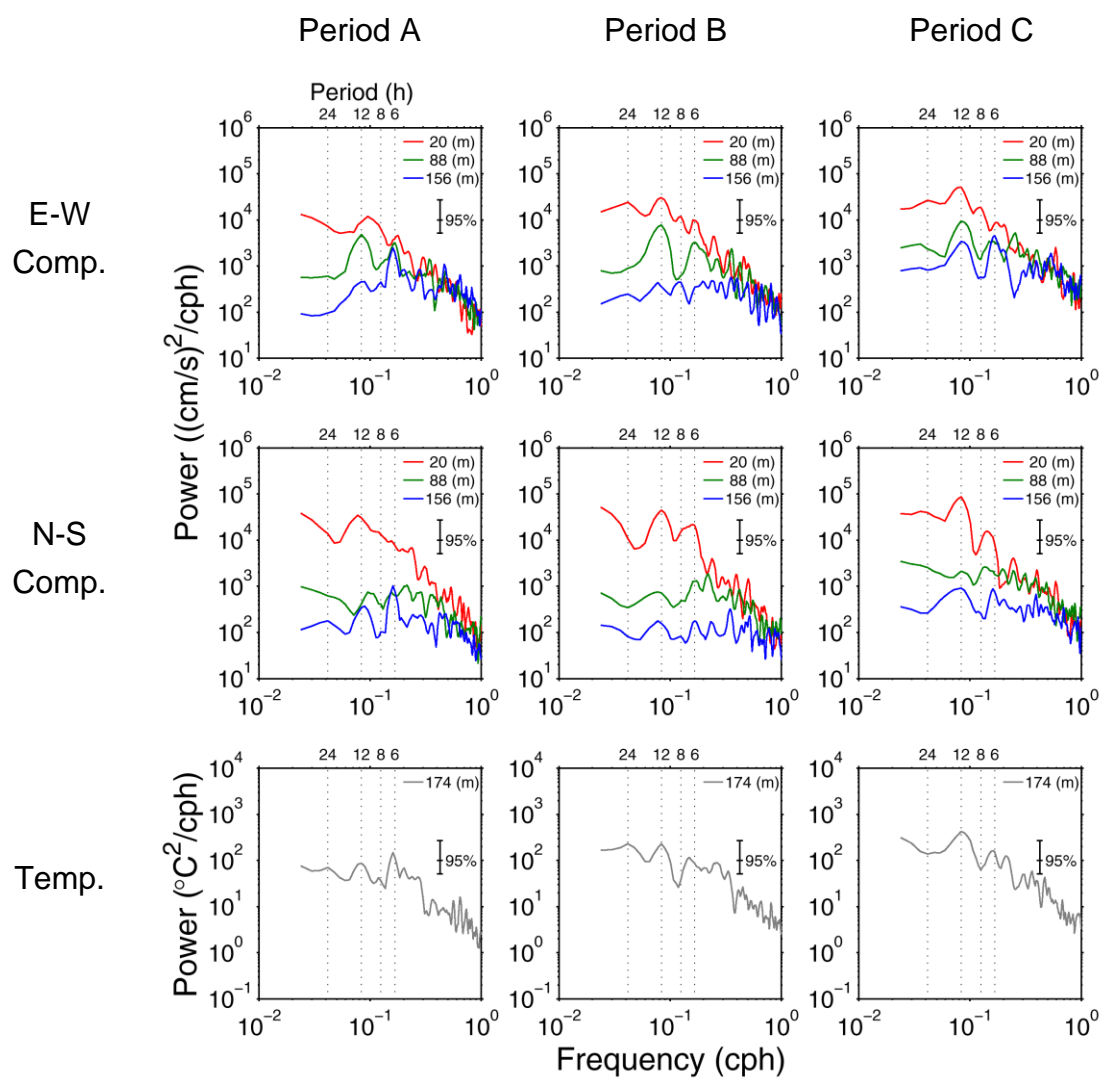
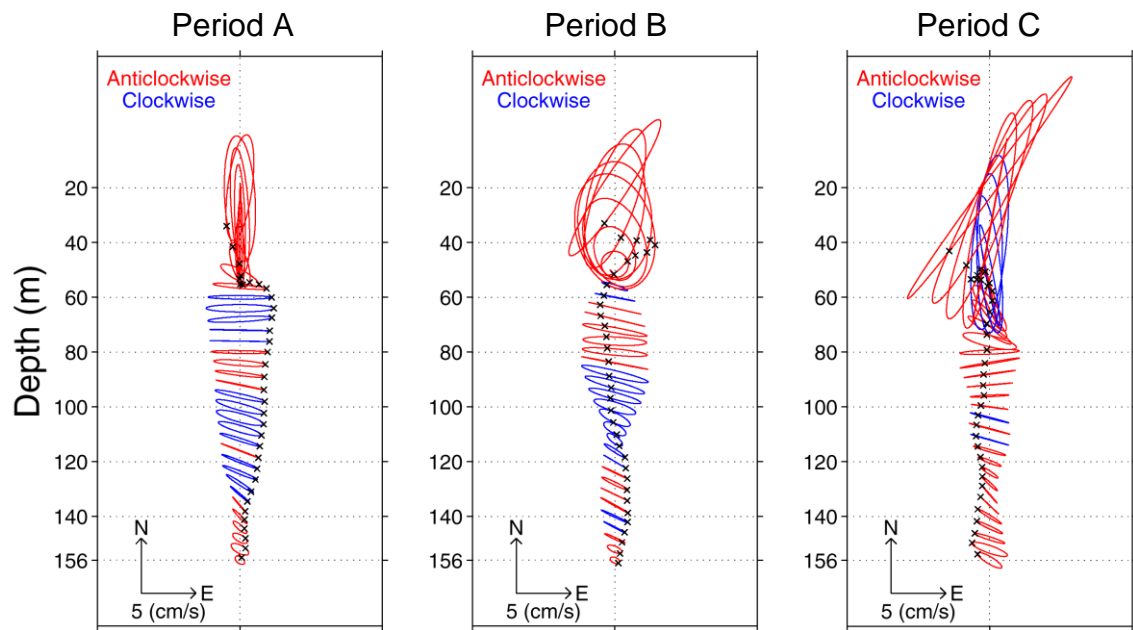


図 8 代表的な深度における各期間での流速・水温のパワースペクトル。95%の信頼限界を載せた。

(M₂ 分潮)



(M₄ 分潮)

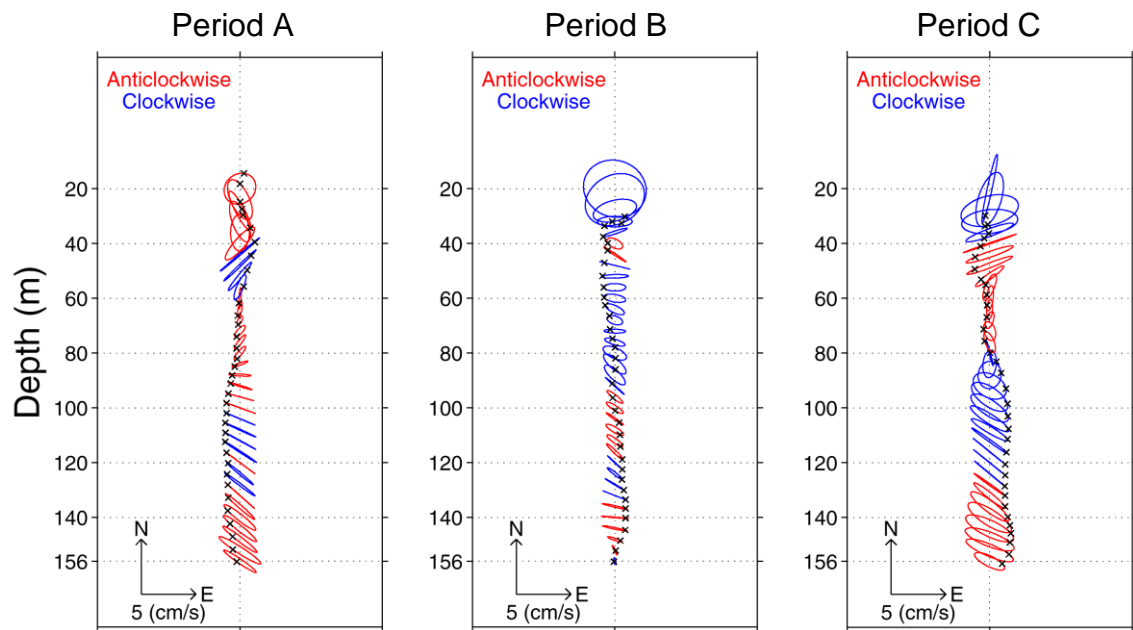


図 9.1 各期間での M₂・M₄ 分潮の潮流楕円。仮想天体の南中時の位置を×で示した。

表 9.2 各期間での M_2 分潮の表層の潮流楕円の長軸と長軸の方向。方向は、
-90~90 で示し、西を-90、北を 0、東を 90 とした。

| Depth (m) | Period A | | Period B | | Period C | |
|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| | Major Axis | Direction | Major Axis | Direction | Major Axis | Direction |
| | (cm/s) | (°) | (cm/s) | (°) | (cm/s) | (°) |
| 20 | 4.9 | 7 | 7.4 | 33 | 12.6 | 36 |
| 24 | 5.7 | -4 | 6.7 | 19 | 10.8 | 28 |
| 28 | 5.6 | -4 | 6.1 | 9 | 10.6 | 20 |
| 32 | 5.1 | -2 | 5.4 | -1 | 10.0 | 12 |
| 36 | 4.4 | 1 | 5.4 | -16 | 8.6 | 11 |
| 40 | 4.0 | 1 | 4.2 | -21 | 8.0 | 6 |

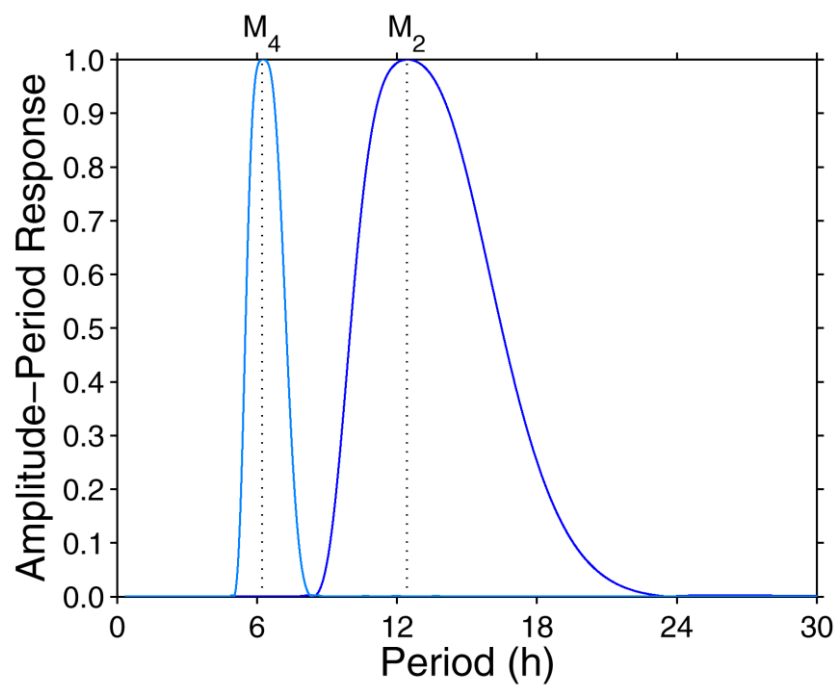
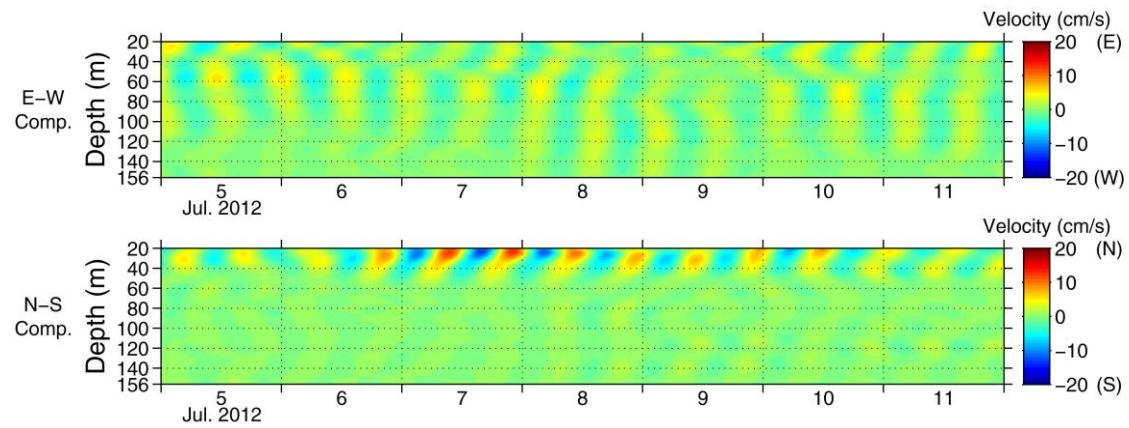
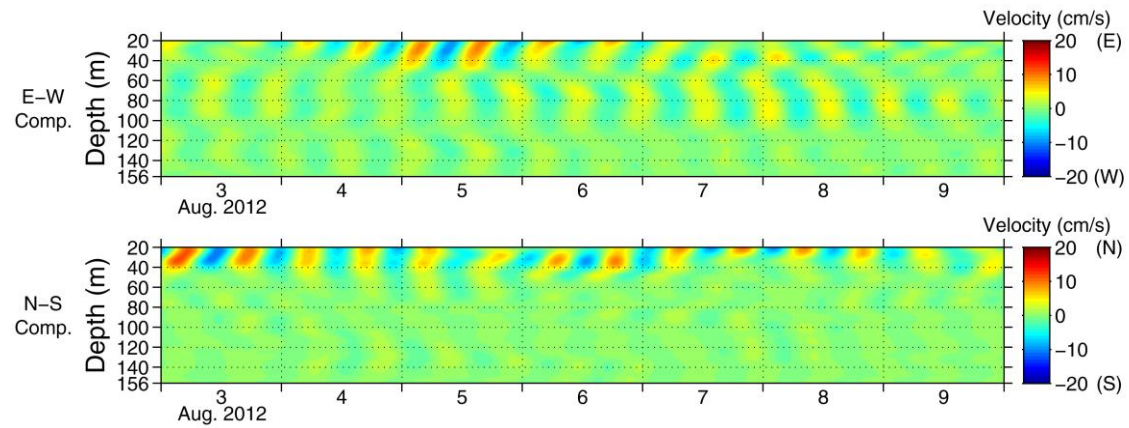


図 10 半日・1/4 日周期の変動を抽出するために作成したバンドパスフィルターの振幅特性。フィルターは、期間を 4 日とし、ハミングウィンドウを施した。青色は半日周期、水色は 1/4 日周期用のフィルターである。

Period A



Period B



Period C

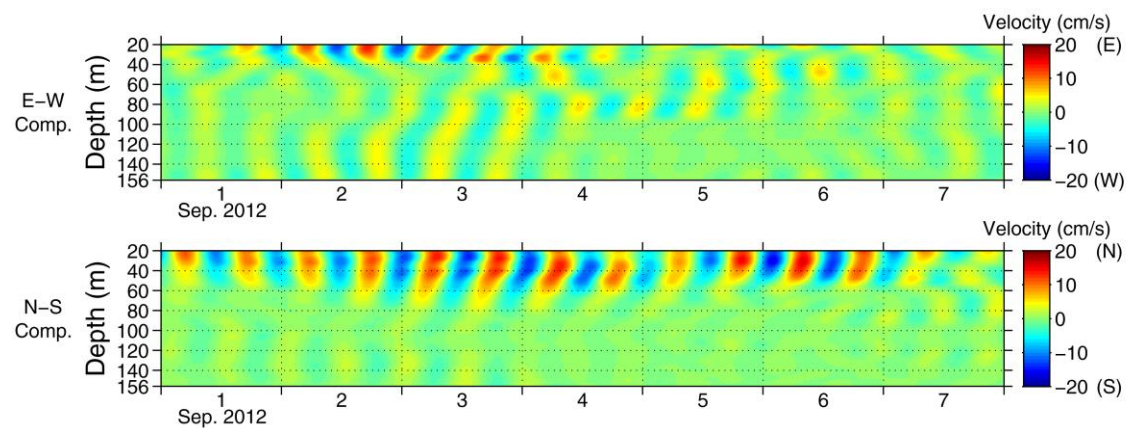
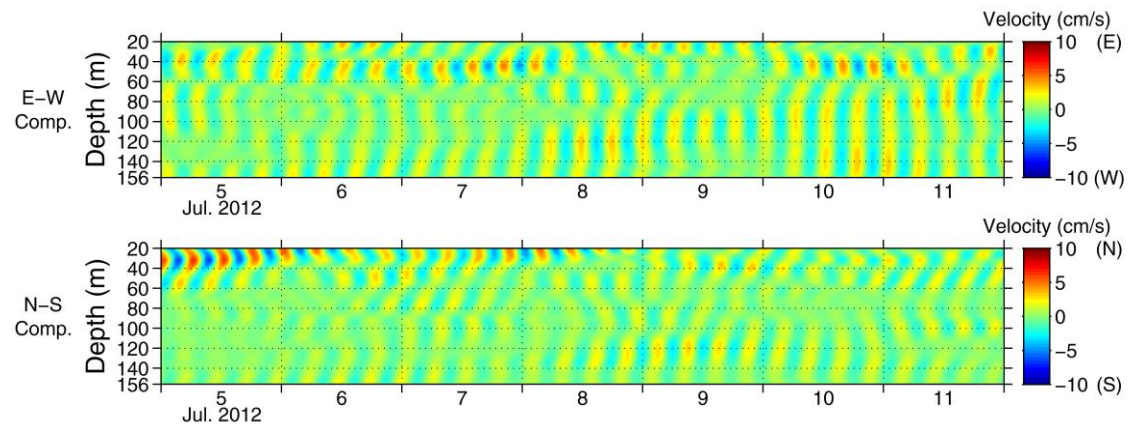
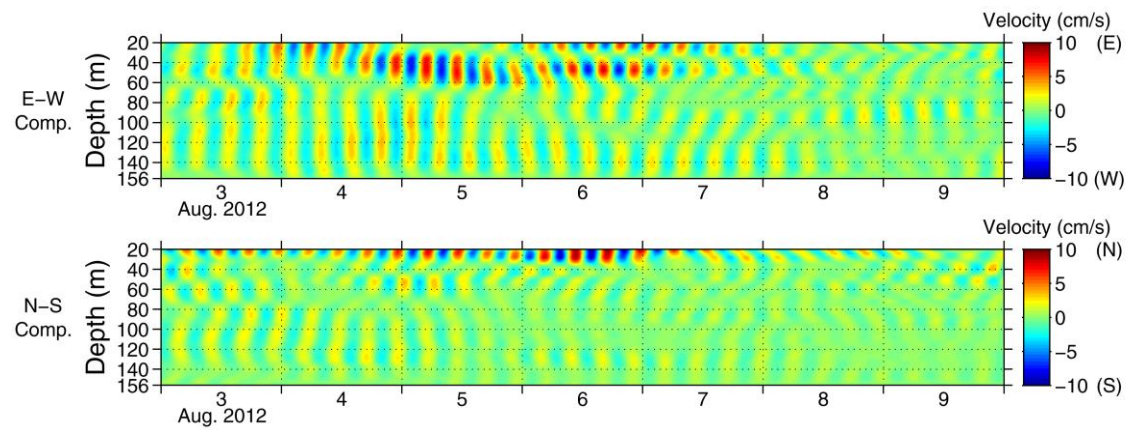


図 11.1 半日周期のバンドパスフィルターを施した各期間での流速の時系列。

Period A



Period B



Period C

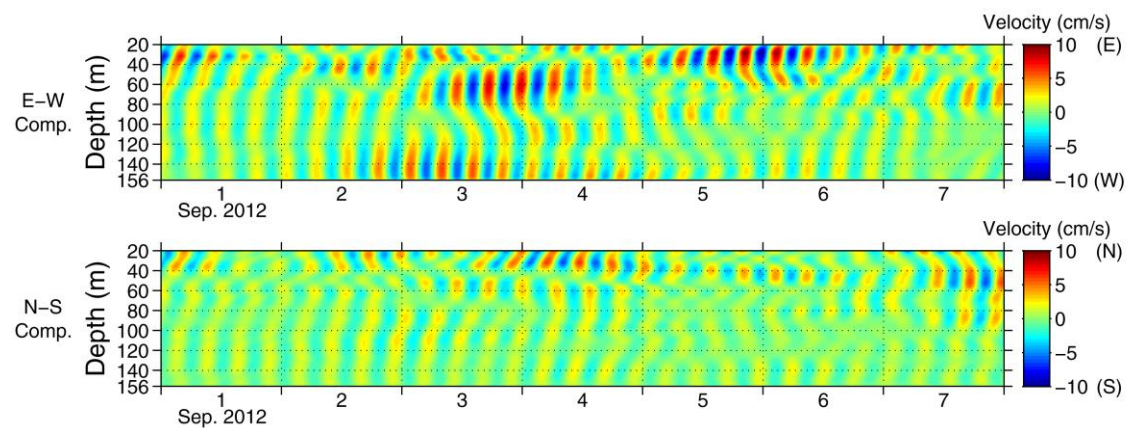


図 11.2 1/4 日周期のバンドパスフィルターを施した各期間での流速の時系列。

表 12 代表的な深度における各期間での合計の流速の運動エネルギー(J/m³)。

(a) 半日周期の南北成分の運動エネルギー。

(b) 1/4 日周期の東西成分の運動エネルギー。

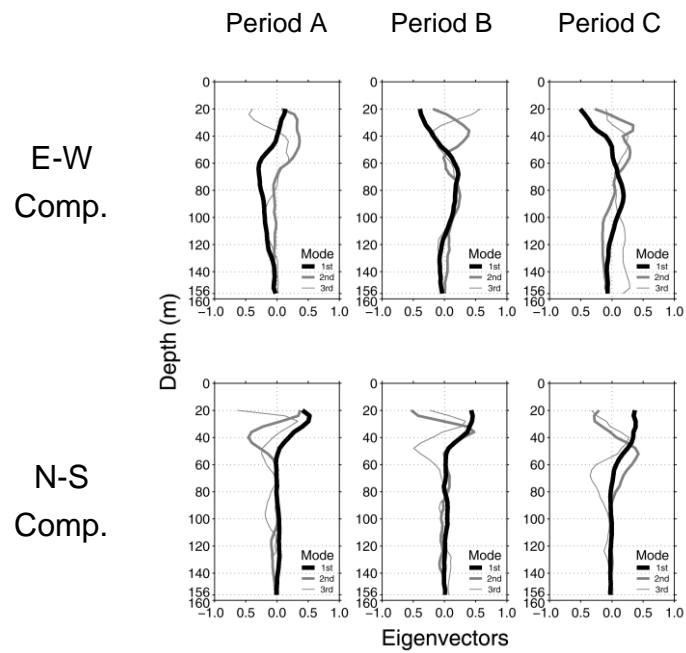
(a)

| Depth (m) | Period A | Period B | Period C |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 20 | 1.1×10^3 | 1.4×10^3 | 2.9×10^3 |
| 40 | 4.7×10^2 | 5.4×10^2 | 2.4×10^3 |
| 60 | 2.3×10^1 | 4.3×10^1 | 4.6×10^2 |
| 80 | 1.8×10^1 | 1.7×10^1 | 7.1×10^1 |
| 100 | 1.8×10^1 | 1.9×10^1 | 2.7×10^1 |
| 120 | 2.9×10^1 | 2.0×10^1 | 3.8×10^1 |
| 140 | 2.5×10^1 | 2.3×10^1 | 4.2×10^1 |
| 156 | 8.9×10^0 | 6.0×10^0 | 3.3×10^1 |

(b)

| Depth (m) | Period A | Period B | Period C |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 20 | 1.5×10^2 | 3.5×10^2 | 2.7×10^2 |
| 40 | 1.8×10^2 | 3.2×10^2 | 3.4×10^2 |
| 60 | 6.1×10^1 | 1.3×10^2 | 3.7×10^2 |
| 80 | 8.2×10^1 | 9.3×10^1 | 1.9×10^2 |
| 100 | 9.5×10^1 | 1.0×10^2 | 1.1×10^2 |
| 120 | 9.6×10^1 | 1.1×10^2 | 1.1×10^2 |
| 140 | 9.4×10^1 | 1.4×10^2 | 2.3×10^2 |
| 156 | 7.6×10^1 | 1.2×10^1 | 1.5×10^2 |

(半日周期)



(1/4 日周期)

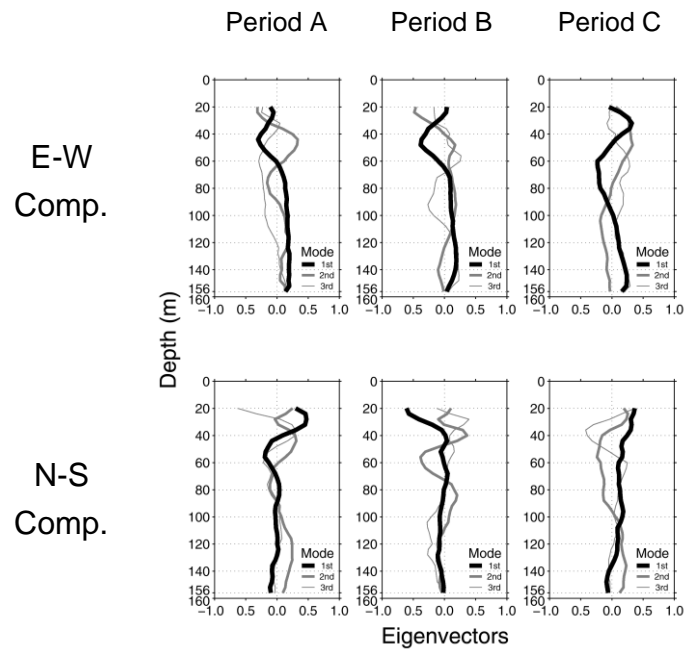


図 13.1 各期間での EOF 解析による流速の鉛直構造。黒色は EOF 第 1 モード、灰色は EOF 第 2 モード、細い灰色は EOF 第 3 モードである。

表 13.2 各期間での流速の EOF 第 1~3 モードの固有値と寄与率。()は寄与率である。

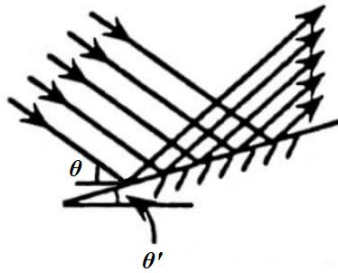
(半日周期)

| | Mode | Period A | Period B | Period C |
|--------------|------|--------------|---------------|---------------|
| E-W Comp. | 1st | 56.3 (53.9%) | 80.3 (54.3%) | 106.5 (47.2%) |
| | 2nd | 17.6 (16.9%) | 35.4 (23.9%) | 44.6 (19.8%) |
| | 3rd | 13.0 (12.5%) | 17.1 (11.5%) | 29.8 (13.2%) |
| | Mode | Period A | Period B | Period C |
| N-S Comp. | 1st | 95.9 (72.0%) | 113.1 (75.3%) | 383.4 (81.5%) |
| | 2nd | 26.3 (19.8%) | 18.7 (12.5%) | 55.5 (11.8%) |
| | 3rd | 4.4 (3.3%) | 7.7 (5.2%) | 14.0 (3.0%) |

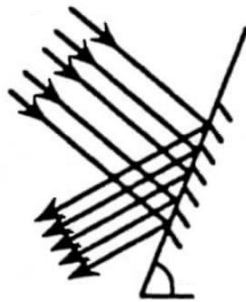
(1/4 日周期)

| | Mode | Period A | Period B | Period C |
|--------------|------|--------------|--------------|--------------|
| E-W Comp. | 1st | 39.3 (55.8%) | 61.6 (56.3%) | 60.9 (37.1%) |
| | 2nd | 8.8 (12.4%) | 27.0 (24.7%) | 43.2 (26.3%) |
| | 3rd | 7.5 (10.6%) | 6.4 (5.8%) | 22.3 (13.9%) |
| | Mode | Period A | Period B | Period C |
| N-S Comp. | 1st | 22.5 (40.0%) | 37.6 (57.3%) | 24.4 (31.0%) |
| | 2nd | 14.5 (25.8%) | 7.7 (11.8%) | 17.0 (21.7%) |
| | 3rd | 7.5 (13.3%) | 7.1 (10.8%) | 15.1 (19.2%) |

(a)



(b)



(c)

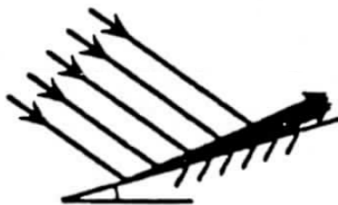


図 14 内部波の反射の模式図。 θ は入射する内部波と水平面のなす角度、 θ' は海底地形と水平面のなす角度である。

- (a) $\theta > \theta'$ のときの内部波の反射。内部波は前方反射(Subcritical)する。
- (b) $\theta < \theta'$ のときの内部波の反射。内部波は後方反射(Supercritical)する。
- (c) $\theta \approx \theta'$ のときの内部波の反射。内部波は Near Critical となり増幅する。

(宇野木(1993)より引用、一部改変)

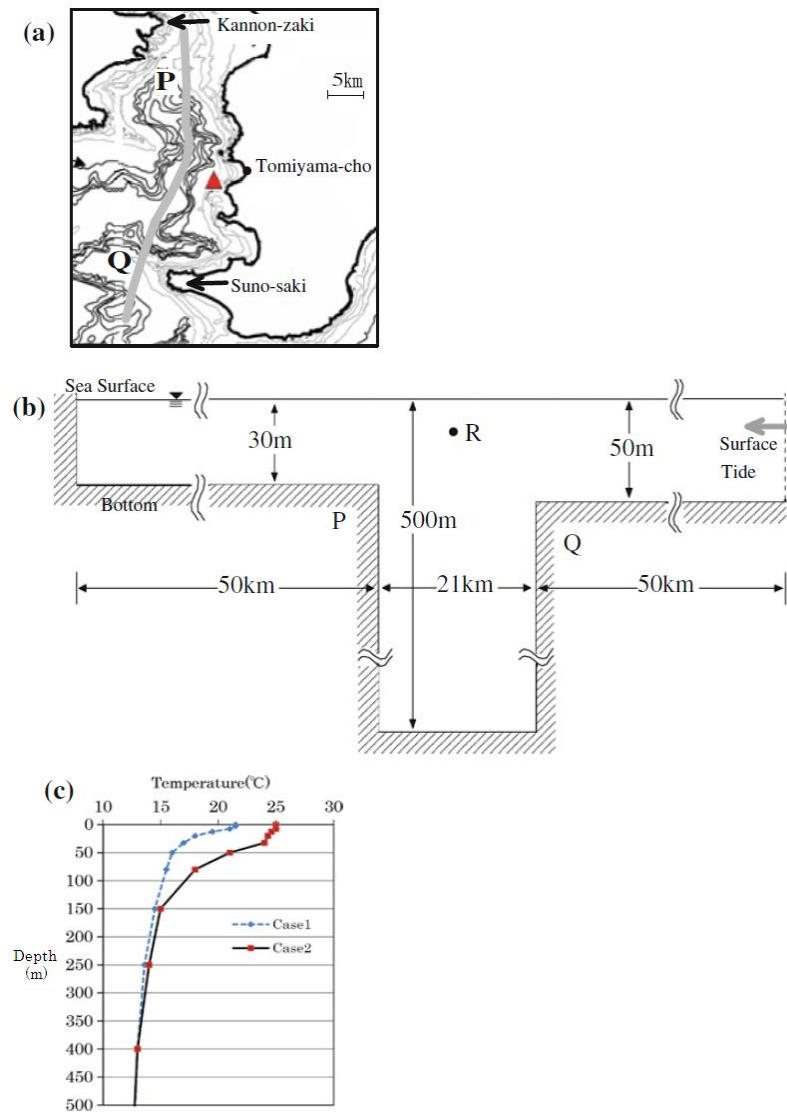


図 15.1 Kitade *et al.*(2011)の数値実験の条件。

- (a) P・Q の地点。
- (b) 東京湾を簡易的にした地形と、R の地点。(a)の灰色の線をたどると、(b)となる。
- (c) 水温の鉛直プロファイル。Case 1 は 6 月のプロファイルで、Case 2 は 9 月のプロファイルである。

(Kitade *et al.*(2011)より引用、一部改変)

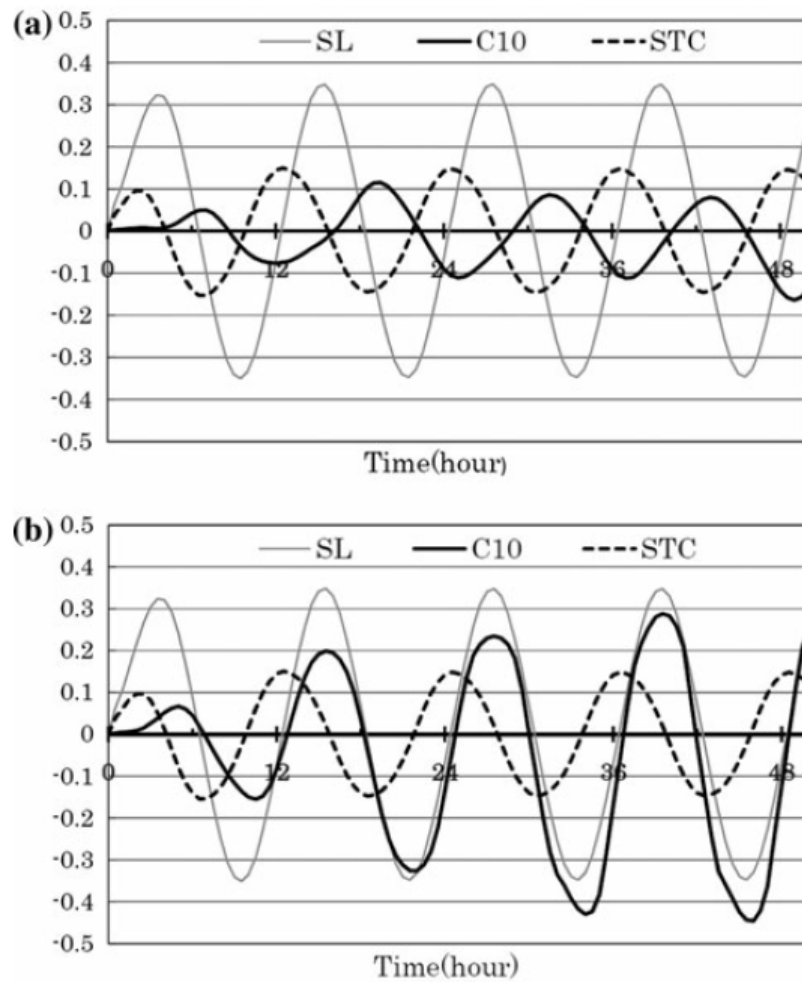


図 15.2 Kitade *et al.*(2011)の数値実験の結果。SL は潮位(m)、C10 は地点 R の 10m 深の流速(m/s)、STC は順圧流速(m/s)である。

(a) Case 1 での SL・C10・STC の時系列。

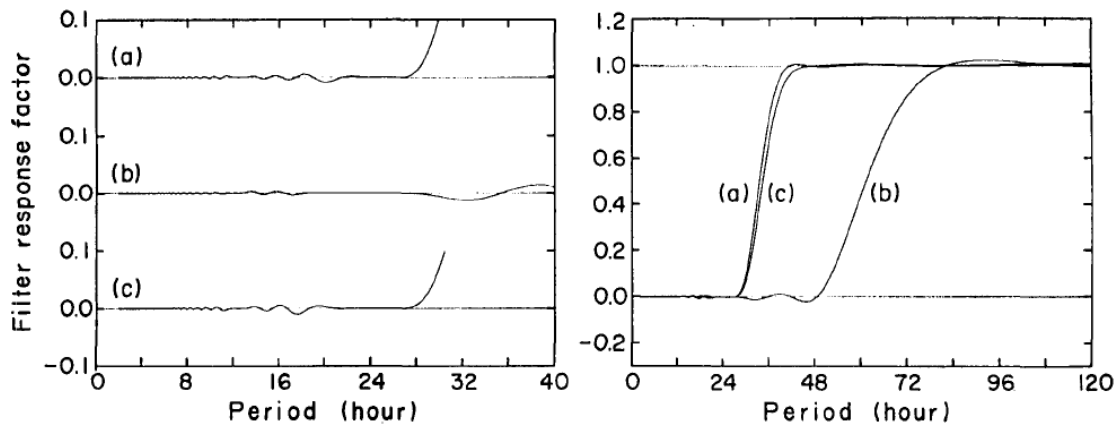
(b) Case 2 での SL・C10・STC の時系列。

(Kitade *et al.*(2011)より引用)

表 16 潮位と 20m 深の流速の半日周期(今回は 12.00h)の各期間でのコヒーレンス(上段)・フェイズ(下段)。フェイズは潮位を基準とし、+(-)であれば基準より早い(遅い)こととした。95%のコヒーレンスの信頼限界(0.63)を超えているときのコヒーレンス・フェイズを太字で示した。

| | Period A | Period B | Period C |
|-------|----------|-------------|-------------|
| E-W | 0.20 | 0.76 | 0.92 |
| Comp. | -87 | 63 | -8 |
| N-S | 0.62 | 0.89 | 0.96 |
| Comp. | -166 | -1 | -36 |

(a)



(b)

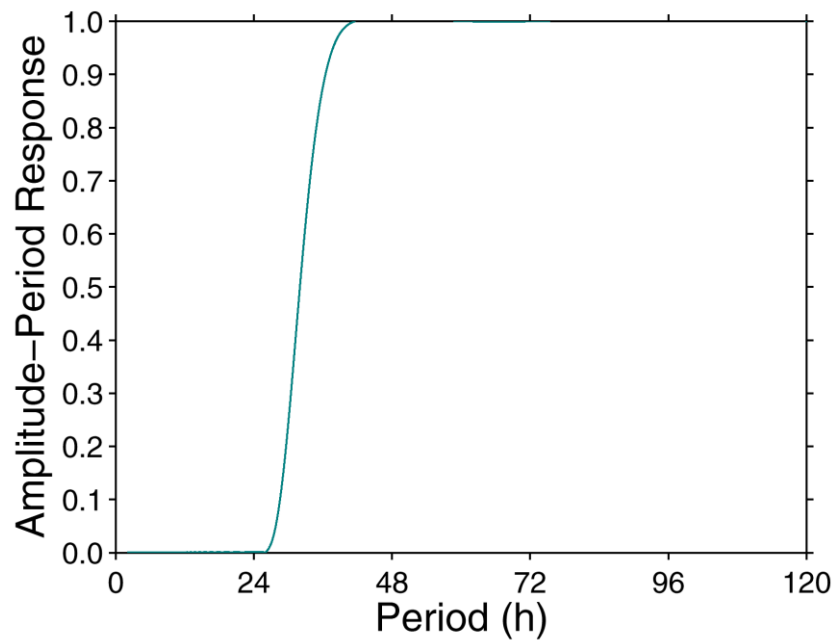


図 17

- (a) タイドキラーフィルターの周波数応答関数(振幅特性とほぼ同義)。図中の
(c)が 24h タイドキラーフィルターである。(花輪・三寺(1985)より引用)
- (b) 潮汐成分を除去するために作成した 32h ローパスフィルターの振幅特性。
フィルターは、期間を 10 日とし、ハミングウィンドウを施した。

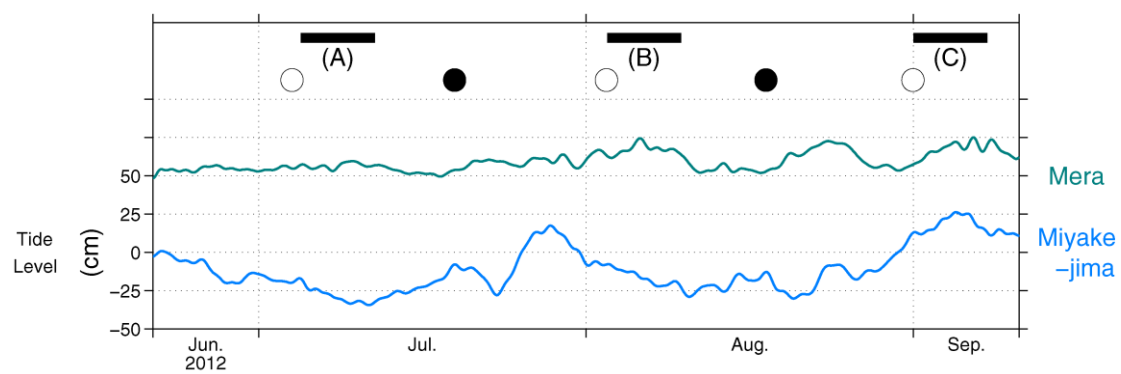


図 18 32h ローパスフィルターを施した三宅島と布良の潮位。三宅島を基準とし、布良を 50cm ずらして描いた。○は満月、●は新月、(A)~(C)は解析期間である。

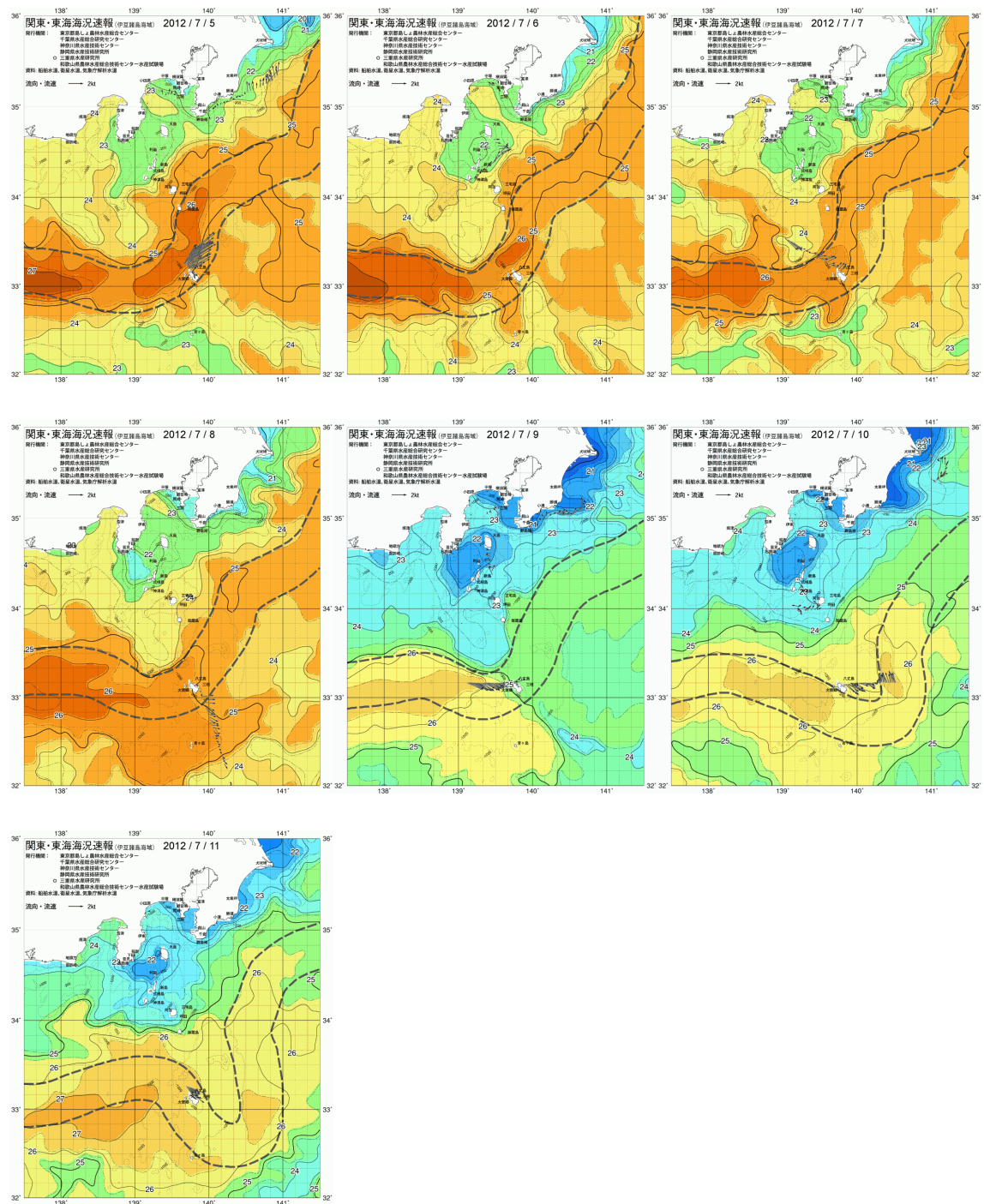


図 19.1 期間 A の関東・東海海況速報。(神奈川県水産技術センターより引用)

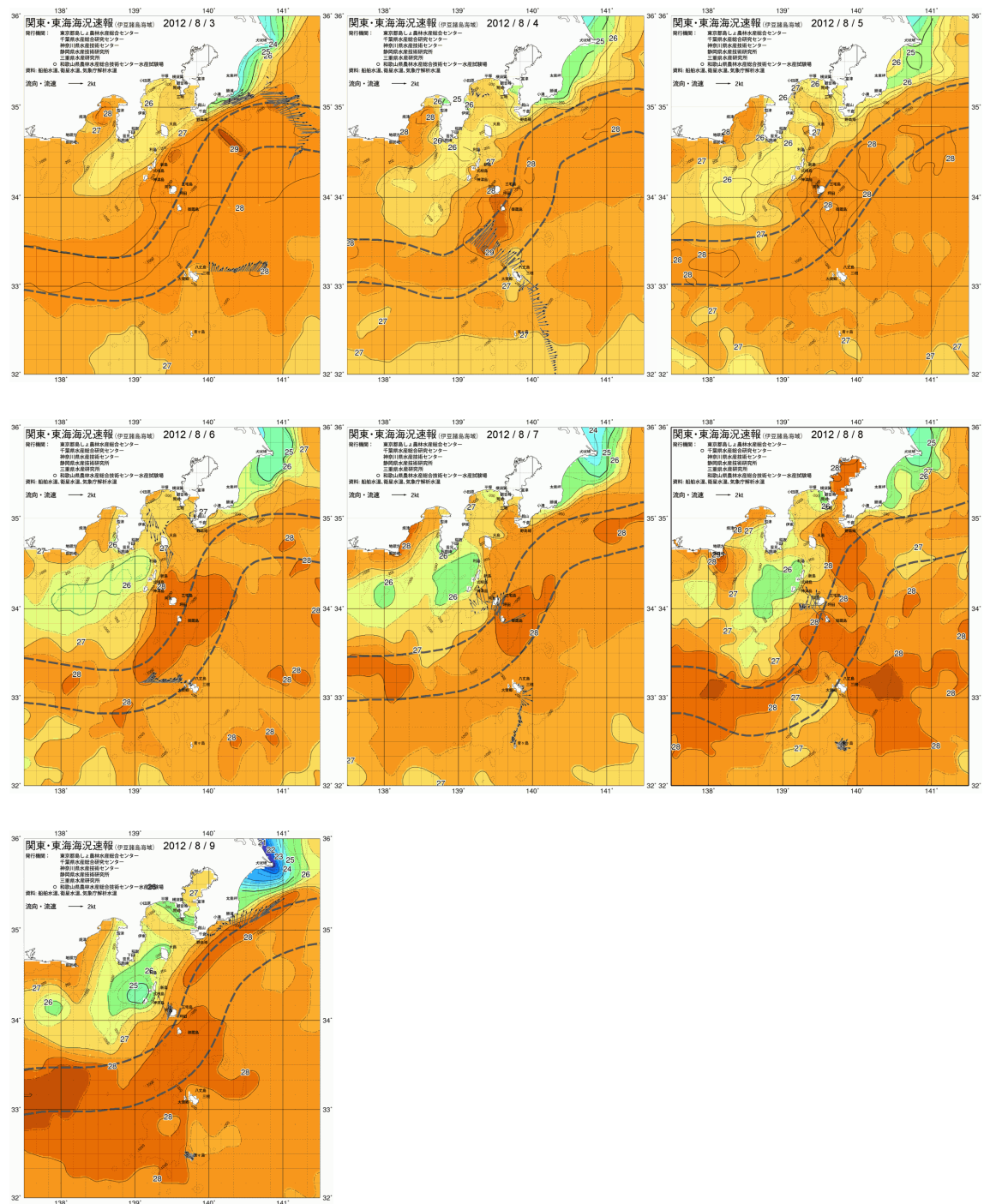


図 19.2 期間 B の関東・東海海況速報。(神奈川県水産技術センターより引用)

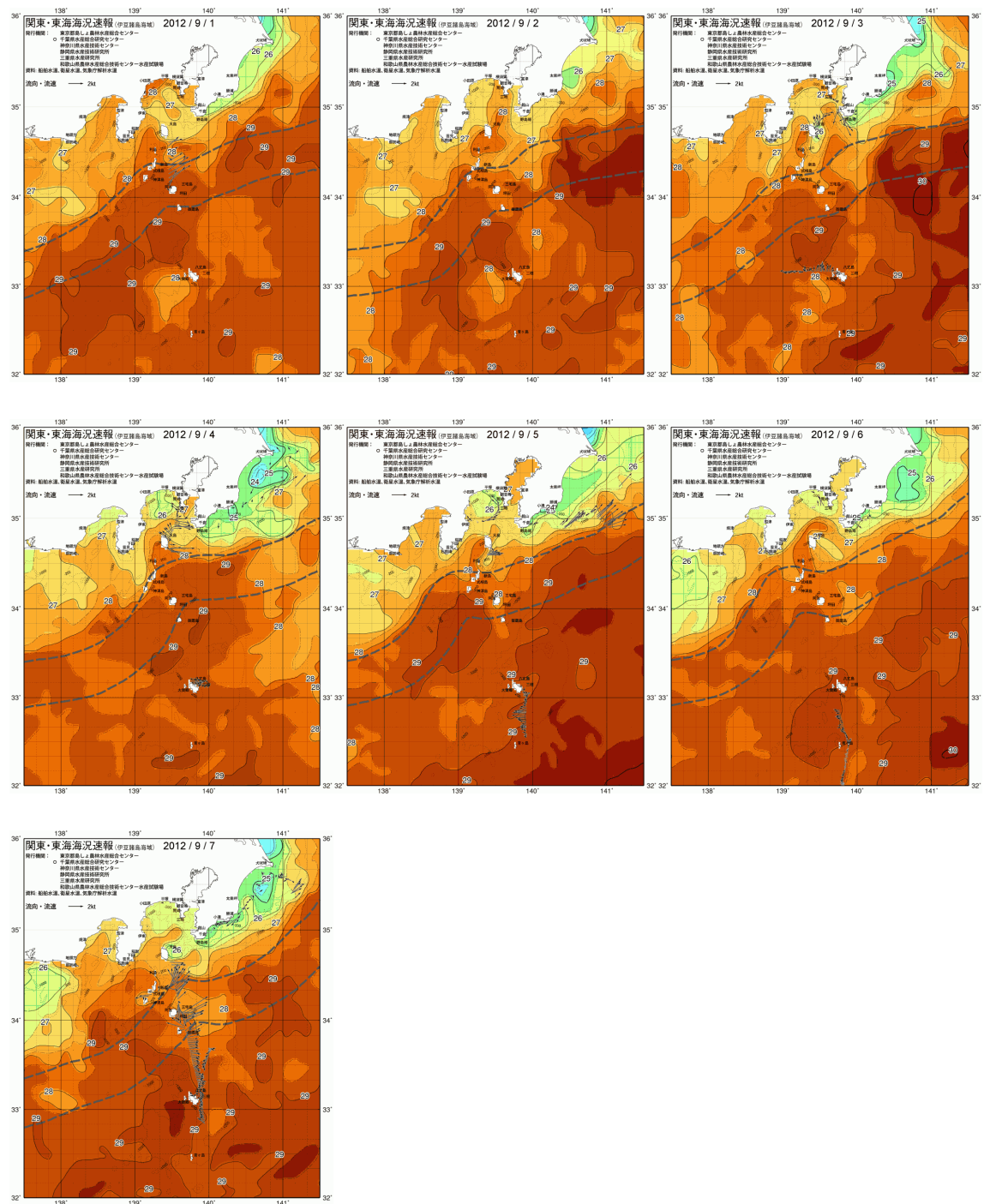


図 19.3 期間 C の関東・東海海況速報。(神奈川県水産技術センターより引用)

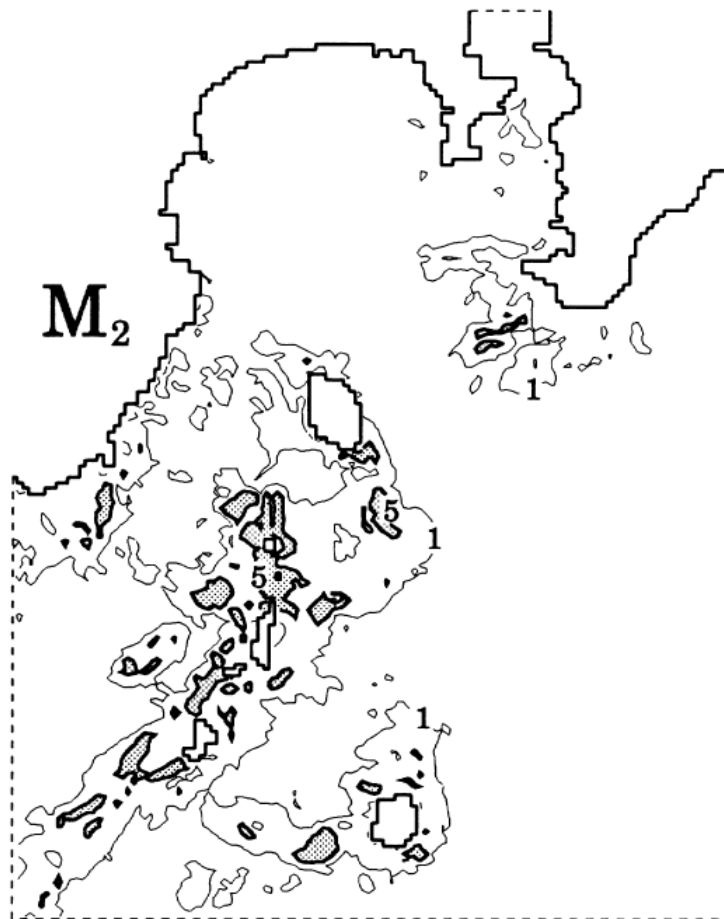


図 20 東京湾付近の内部潮汐(M_2 分潮)の発生域。(Kitade and Matsuyama(1997)より引用)

表 21

- (a) 各期間での布良の潮位の M₂ 分潮(今回は 12.00h)と M₄ 分潮(今回は 6.22h)の周期のパワースペクトル(cm²/cph)と、M₂ 分潮と M₄ 分潮のパワースペクトルの比。
- (b) 各期間での 156m 深の東西成分の M₂ 分潮(今回は 12.00h)と M₄ 分潮(今回は 6.22h)の周期のパワースペクトル((cm/s)²/cph)と、M₂ 分潮と M₄ 分潮のパワースペクトルの比。

(a)

| | Period A | Period B | Period C |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| M ₂ | 1.5×10 ⁶ | 1.6×10 ⁶ | 1.9×10 ⁶ |
| M ₄ | 1.4×10 ³ | 1.7×10 ³ | 1.7×10 ³ |
| M ₄ / M ₂ | 9.7×10 ⁻⁴ | 1.0×10 ⁻³ | 8.8×10 ⁻⁴ |

(b)

| | Period A | Period B | Period C |
|---------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| M ₂ | 4.6×10 ² | 3.6×10 ² | 3.4×10 ³ |
| M ₄ | 2.5×10 ³ | 2.8×10 ² | 4.2×10 ³ |
| M ₄ / M ₂ | 5.4×10 ⁰ | 7.8×10 ⁻¹ | 1.2×10 ⁰ |

表 22 期間 C の底層での東西成分の M4 分潮 (今回は 6.22h) の周期のコヒーレンス(上段)・フェイズ(下段)。フェイズは浅い方を基準とし、+(-)であれば基準より早い(遅い)こととした。95%のコヒーレンスの信頼限界(0.63)を超えているときのコヒーレンス・フェイズを太字で示した。

| | 132 (m) | 144 (m) | 156 (m) |
|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 120 (m) | 0.84 24 | 0.82 59 | 0.74 63 |
| 132 (m) | | 0.96 20 | 0.95 30 |
| 144 (m) | | | 0.94 16 |

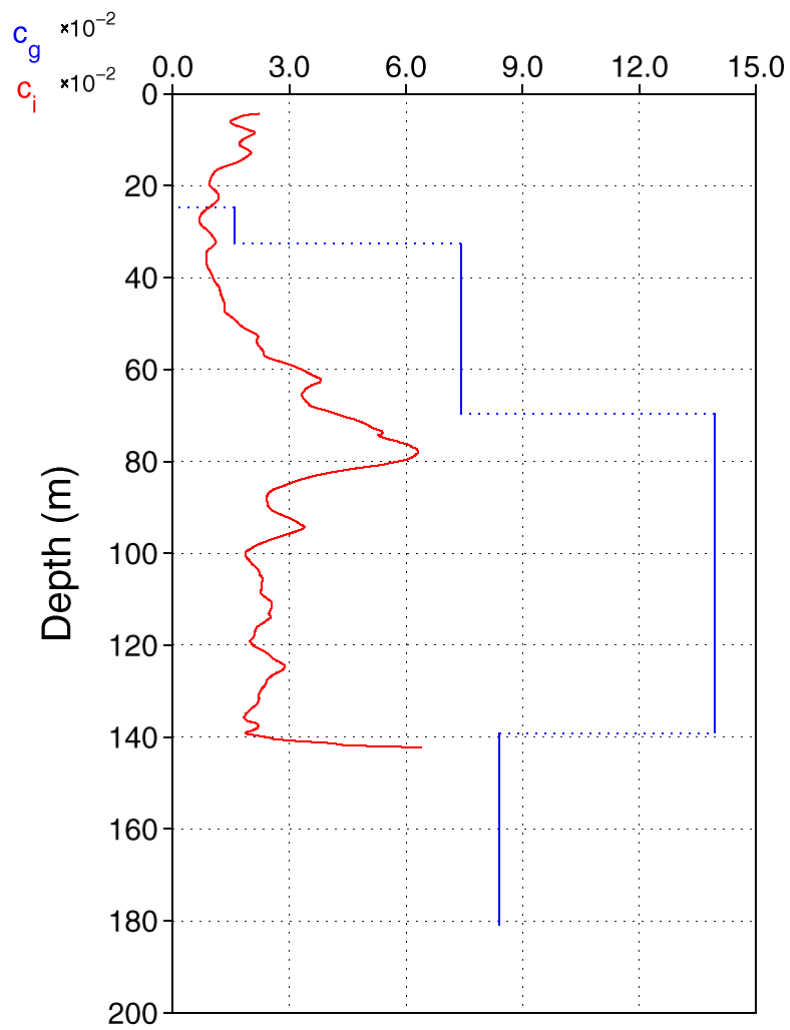


図 23 期間 C での 1/4 日周期の高調波内部波の特性曲線 c_i の傾きと、係留地点から東に位置する海底地形 c_g の傾きの鉛直プロファイル。横軸は縦横比である。

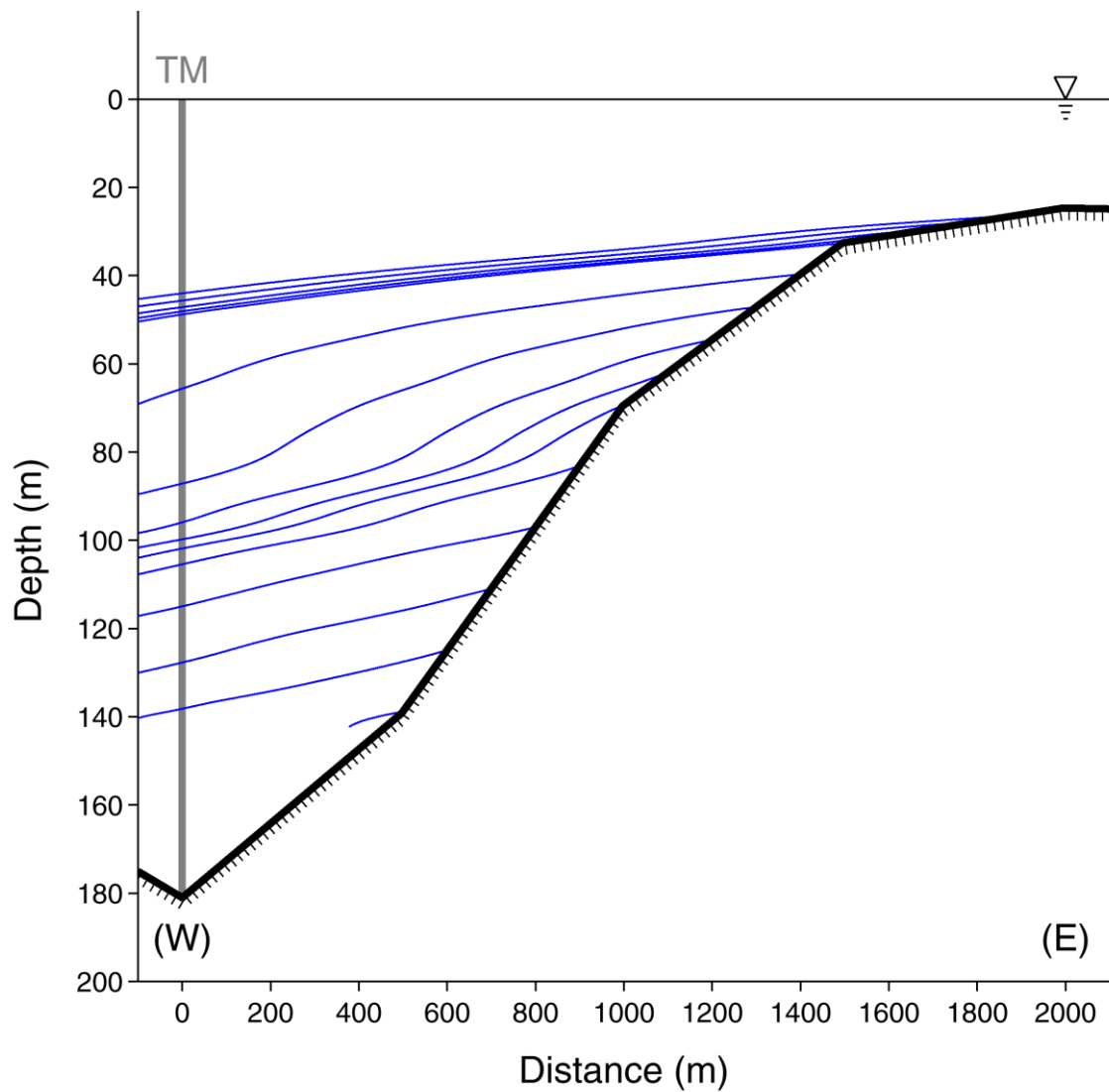


図 24 期間 C での後方反射した 1/4 日周期の高調波内部波の東西方向の特性曲線と海底地形。特性曲線は、係留地点(TM)から東に 500m~1900m のところから 100m ごとに描いた。